Atlas de Biomassa de Minas Gerais

NOE Novas Opções Energéticas

FAPEMIG

P&D ANEEL

CEMIG

MINAS GERAIS GOVERNO DE TODOS

Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Alternativas Sustentáveis:

*o estado de **Minas Gerais** cresce com responsabilidade!*

NOE Novas Opções Energéticas

FAPEMIG

P&D ANEEL

CEMIG

MINAS GERAIS GOVERNO DE TODOS

Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Dados internacionais de catalogação da publicação

R375t Atlas de Biomassa de Minas Gerais
Ruibran Januário dos Reis e
Luciano Sathler dos Reis (Org.). Belo Horizonte, 2017.
Editora: Rona Gráfica e Editora
100 pgs.: ilust.

ISBN: 978-85-8239-052-8

1. Biomassa. 2. Climatologia 3. Mapeamento.
I. Reis, Ruibran Januário dos.

CDU: 551.58

EXPEDIENTE

Presidente (DPR)
Bernardo Afonso Salomão de Alvarenga

Vice-Presidente (DVP)
Bernardo Afonso Salomão de Alvarenga, interina e cumulativamente com suas funções de Diretor-Presidente

Diretor Comercial (DCM)
Dimas Costa

Diretor Interino de Distribuição e Comercialização (DDC)
Ronaldo Gomes de Abreu

Diretor de Desenvolvimento de Negócios (DDN)
César Vaz de Melo Fernandes

Diretor de Finanças e Relações com Investidores (DFN)
Adézio de Almeida Lima

Diretor de Gestão Empresarial (DGE)
José de Araújo Lins Neto

Diretor de Geração e Transmissão (DGT)
Franklin Moreira Gonçalves

Diretor Jurídico (DJR)
Luciano de Araújo Ferraz

Diretor de Relações Institucionais e Comunicação (DRC)
Adézio de Almeida Lima, interina e cumulativamente com suas funções de Diretor de Finanças e Relações com Investidores

Diretora de Relações e Recursos Humanos (DRH)
Maura Galuppo Botelho Martins

ATLAS DE BIOMASSA DE MINAS GERAIS

Projeto de P&D Cemig/Aneel GT0557
Projeto APQ-03677-12

Uma publicação da
Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG

Av. Barbacena, 1.200 – 20º andar – Tel.: (31) 3506-2607
Caixa Postal 992 – Belo Horizonte/MG
E-mail: TETN - gerenciadegestaotecnologica@cemig.com.br
End. Internet: www.cemig.com.br

COORDENAÇÃO DE EDIÇÃO

Ruibran Januário dos Reis
Luciano Sathler dos Reis
Cláudio Homero Ferreira da Silva

Projeto gráfico e direção de arte: Omar Vianello
Diagramação: Vianello Comunicação
Revisão de textos: Marly Corrêa Filha
Produção Gráfica: Luiz Carlos Queiroz
Fotos Ilustrativas: Shutterstock e Pexels Photo

PESQUISADORES

Adriano Henrique Ferrarez
Adriano da Silva Antônio
Angélica de Cássia O. Carneiro
Benedito Rocha Vital
Carlos Antônio Alvares S.Ribeiro
Daniel Perreira Guimares
Delly Oliveira Filho
Eduardo de Aguiar do Couto
Fabrício Rodrigues Costa
Iann Gomes Rodrigues da Fonseca
João Francisco de Abreu
Joel Gripp Junior
Juliana Ferreira Lorentz
Lilianne Aparecida L. de Oliveira
Maria Lúcia Calijuri
Melina Amoni Silveira Alves
Paulo Fernandes Trugilho
Paula Peixoto Assemany
Roberto Rodrigues Avelar
Sabrina do Carmo Alves
Sandro Laudares
Thaisa Ribeiro Teixeira
Viviane Augusta Pascoal

Apresentação do Atlas de Biomassa de Minas Gerais

A Companhia Energética de Minas Gerais, ao longo dos seus 65 anos de existência alcançou o reconhecimento mundial pelo seu trabalho e cuidado com as questões sobre sustentabilidade.

Por 17 anos consecutivos a Empresa encontra-se listada no Índice Dow Jones de Sustentabilidade, feito único para empresas brasileiras.

Alinhada com a tendência mundial para a construção de uma matriz energética mais renovável, a Cemig apresenta o Atlas de Biomassa de Minas Gerais.

Uma das prioridades do Governo do Estado é assegurar a Minas Gerais condições para o desenvolvimento sustentável. Dentre as ações necessárias, o levantamento da disponibilidade de energia, se mostra essencial para o desenvolvimento de empreendimentos, cujas consequências serão o crescimento econômico e o bem-estar do povo mineiro.

Chegou a hora de mapear a biomassa completando o painel de potencial de energia renovável em Minas Gerais. Trata-se de uma fonte bastante versátil, podendo ser aplicada também a outros segmentos além da produção de eletricidade.

Nesse sentido torna-se primordial conhecer as condições climáticas e as culturas agrícolas do estado resultando no mapeamento do potencial energético associado aos resíduos e as culturas energéticas. A elaboração deste Atlas se configura em um painel de prospecção das oportunidades em energia da biomassa com vistas à identificação de áreas promissoras para a exploração desse energético no impulso ao desenvolvimento de negócios e pesquisas como também para o aprofundamento da discussão e reflexão sobre a inserção da biomassa na matriz energética mineira.

Cláudio Homero Ferreira da Silva, *DSc.*

Mensagem do Presidente do Conselho de Administração e do Diretor-Presidente da Cemig

Em 1952, o então governador Juscelino Kubitschek concebeu a Cemig com o objetivo de promover o desenvolvimento do Estado de Minas Gerais, assegurando energia elétrica para a instalação e desenvolvimento do parque industrial atendendo a população mineira. A característica renovável encontrava-se na origem da Companhia pelo esforço na implantação de grandes usinas hidrelétricas, que asseguraram confiabilidade e abundância de eletricidade. A história da Empresa se mistura à construção do sistema elétrico brasileiro, reservando à Cemig um lugar de destaque em função da envergadura de seus projetos e da relevância de seus resultados.

A sociedade atual enfrenta os desafios do esgotamento de recursos naturais e das emissões de gases de efeito estufa. Esses vetores conduzem ao desenvolvimento de ações para a eficiência energética, eficiência de processos (tecnologia) e diversificação da matriz energética. São preocupações globais, mas que dependem de ações locais. Disso decorre o interesse nas fontes renováveis. Nesse contexto, a Cemig, visando o futuro, liderou o processo de prospecção dos potenciais eólico, solar e de biomassa em Minas Gerais. Os Atlas Eólico e Solar foram produzidos em 2010 e 2012, respectivamente. Agora é o momento de apresentar o potencial da biomassa, completando o cenário renovável no estado.

A energia da biomassa possui alguns diferenciais, tais como a diversidade de origem, a dispersão geográfica e a variedade de tecnologias aplicáveis. Dentre os seus principais benefícios podemos citar: o aumento da eficiência da fonte energética pelo uso de resíduos, a contribuição para a redução de emissões pela substituição de combustíveis fósseis e o fomento ao desenvolvimento local e regional. As tecnologias aplicáveis são portadoras de futuro, uma vez que seu uso se caracteriza pelo pequeno porte e se insere no painel da geração distribuída, compondo as visões de futuro para o setor elétrico e das redes elétricas inteligentes.

Na verdade, esse não é um assunto novo para a Cemig, embora talvez inédito na escala e magnitude dos tempos atuais. A empresa vem pesquisando a energia renovável em território mineiro desde a década de 1980, quando houve iniciativas associadas à investigação do biogás de resíduos da pecuária, no conceito de fazendas energéticas, e também do uso de carvão vegetal em processos de gaseificação.

A partir dos anos 2000, com a criação do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Cemig desenvolveu vários projetos explorando as tecnologias e novas abordagens quanto à fonte energética da biomassa. Dentre eles, podemos citar: o desenvolvimento de geração distribuída com motores Stirling e microturbinas a gás, os projetos de investigação do adensamento florestal do eucalipto, a pesquisa do uso de etanol e biodiesel para a produção de eletricidade, a produção de hidrogênio por reforma de etanol, o desenvolvimento de catalisadores para a reforma de glicerol, o sistema de purificação para biogás de vinhaça, a utilização dos gases e resíduos do processo de produção de carvão vegetal para cogeração e o mapeamento, além da investigação de tecnologias de utilização de resíduos sólidos urbanos e biogás. Foram projetos que resultaram em protótipos, avaliações de tecnologias, publicações científicas e formação de pesquisadores. Esse conjunto de resultados ajudou a Cemig a se posicionar estrategicamente sobre as questões associadas a tecnologias e a energia da biomassa.

A partir de 2012, o Atlas de Biomassa teve o seu desenvolvimento a partir de uma demanda inserida no Edital de P&D Cemig/Fapemig, contando com uma equipe multidisciplinar de renomados pesquisadores de universidades mineiras.

A pesquisa desenvolveu avanços nas técnicas de zoneamento climático, resultando no mapeamento das áreas mais propícias para cultivo das principais espécies agrícolas e realizou um trabalho de revisão de literatura. Dessa forma o estudo apresentou um panorama geral de cada tipo de fonte de biomassa (milho, café, soja, cana-de-açúcar, eucalipto e resíduos) com aspectos favoráveis para a geração de energia.

O Atlas é essencialmente constituído por mapas de produção, ou disponibilidade de biomassa, e também do potencial energético resultante. Essas figuras sintetizam um amplo levantamento de dados e informações em um autêntico trabalho de pesquisa científica, realizado com o devido rigor metodológico e usando as melhores práticas, gerando um produto a serviço da sociedade.

De posse desses dados, realizou-se o levantamento do potencial energético da biomassa para os 853 municípios do Estado. Como resultado, identificou-se um potencial total teórico de energia elétrica em Minas Gerais, de 2.680 MW, isto é, cerca de 25% da demanda dos consumidores da Cemig Distribuição. Somente o bagaço de cana-de-açúcar tem um potencial estimado de 688 MW ou pouco mais de 8% do parque gerador da Cemig. Não se pretendeu esgotar os assuntos em torno da biomassa ou energia da biomassa, dada a sua diversidade e temporalidade. A intenção foi investigar as principais culturas no presente momento e seus resíduos, possibilitando obter uma base de partida para novas discussões. Dessa forma, esperamos contribuir para o desenvolvimento de uma sociedade sustentável para a criação de novos mercados em energia e para a produção de novas pesquisas no tema.

Bernardo Afonso Salomão de Alvarenga

José Afonso Bicalho Beltrão da Silva

Índice

Capítulo 1

1 Introdução 6
1.1 - Contexto energético 7

Capítulo 2

2 Agrometeorologia de Minas Gerais 8
2.1 Caracterização Geográfica 9
2.1.1 Relevo 9
2.1.2 Solos 10
2.1.3 Hidrografia 10
2.1.4 Vegetação 11
2.2 Climatologia de Minas Gerais 12
2.2.1 Classificação Cimática de Köppen 12
2.2.2 Caracterização da Estação Chuvosa 13
2.2.3 Temperatura do Ar 17
2.3 Zoneamento Climático 18

Capítulo 3

3 Fontes de Biomassa 28
3.1 Café 29
3.2 Cana-de-açúcar 32
3.3 Milho 35
3.4 Soja 37
3.5 Vegetais Lenhosos 39
3.6 Resíduos Sólidos Urbanos 47
3.7 Resíduos do Tratamento de Esgoto 50
3.8 Efluentes Líquidos Animais 52
3.9 Outras Fontes 61

Capítulo 4

4 Potencial energético da biomassa 68
4.1 Poder Calorífico 69
4.2 Potencial Energético do Café 70
4.3 Potencial Energético da Cana de Açúcar 72
4.4 Potencial Energético do Milho 78
4.5 Potencial Energético da Soja 80
4.6 Potencial Energético dos Vegetais Lenhosos 82
4.7 Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos 84
4.8 Potencial Energético dos Efluentes Líquidos Domésticos 86
4.9 Potencial Energético dos Efluentes Líquidos Animais 88

Capítulo 5

5 Fechamento e Conclusões 92
5.1 Desafios 95
5.2 Perspectivas 96

6

6 Referências Bibliográficas 97

NOE Novas Opções Energéticas · FAPEMIG · P&D ANEEL · CEMIG · MINAS GERAIS GOVERNO DE TODOS

Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Capítulo 1

1 Introdução

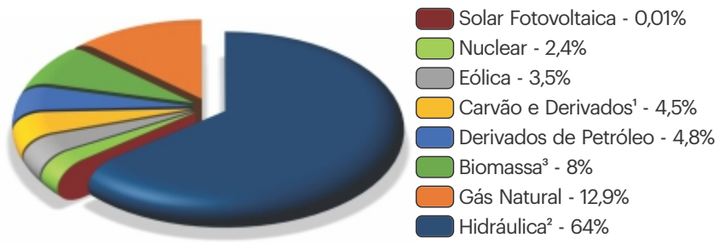
1.1 Contexto Energético

1 - Introdução

O desenvolvimento e a adoção de tecnologias altamente eficientes para a exploração ótima de fontes renováveis de energia limpa são cruciais para se reduzirem os impactos ambientais, minimizar a quantidade de resíduos secundários e, sobretudo, assegurar a sustentabilidade do suprimento de energia, tendo por base os níveis atuais e futuros das demandas econômicas e sociais. Luz e calor são as duas formas primárias de energia solar, sendo absorvidas e convertidas pelo meio ambiente em formas secundárias. Algumas dessas transformações resultam em fontes de energias renováveis, como a biomassa. A crescente conscientização da sociedade acerca dos efeitos deletérios do aquecimento global, vem forçando os governos das principais economias mundiais a construírem uma agenda comum, para se acelerar a substituição das fontes de energia convencionais por fontes renováveis e para a mitigação da emissão de gases de efeito-estufa. Em 2015, a participação de energias renováveis na matriz energética brasileira foi da ordem de 41,2%, já a participação média mundial é de 6,7 % (EPE, 2016; EIA, 2016; PEREIRA et al., 2012). Segundo a BP *Statistical Review of World Energy*, o consumo de fontes renováveis de energia no mundo obtiveram um aumento de 2,8% em 2015, crescimento considerável se comparado com o ano de 2005, no qual foi observado aumento de apenas 0,8%. Países como China e Alemanha registraram os maiores incrementos, 20,9 e 23,5%, respectivamente.

1.1 Contexto Energético

A recente crise hídrica que assola o Brasil expôs, de forma contundente, a vulnerabilidade de se ter uma matriz energética concentrada na hidroeletricidade – atualmente as usinas hidrelétricas fornecem cerca de 64% da eletricidade consumida no país, como pode ser observado na Figura 1 (PEREIRA et al., 2012; EPE, 2016).



[1]Inclui gás de coqueria. [2]Inclui importação. [3]Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações.

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira no ano de 2015 - Fonte: (EPE, 2016)

Em sua vasta maioria, a energia hidrelétrica é gerada a partir de reservatórios de acumulação de água (*WORLD COMMISSION ON DAMS*, 2000; RIBEIRO et al., 2015), o que mostra sua dependência direta do regime e intensidade da precipitação pluviométrica na respectiva bacia de contribuição.

Em que pesem o aumento da utilização de derivados de petróleo (de 4,4% para 6,4%) e a redução da energia hidráulica (de 70,6% para 66,6%) entre 2013 e 2016, a participação de renováveis na Matriz Elétrica Brasileira subiu de 79,3% para 81,5% devido, principalmente, à intensificação do uso de biomassa e de energia eólica (TABELA 1). Esta última aumentou em cerca de 4,5 vezes sua participação na Matriz Elétrica Brasileira neste mesmo período.

Em 2015, o consumo total de energia elétrica no Brasil foi de 464,7 TWh, representando uma queda de 2,1% em relação a 2014 devido, principalmente, à retração de 5,3% no consumo do setor industrial (EPE, 2016). Já a oferta interna de energia elétrica (OIEE) atingiu 615,9 TWh, sendo 1,3% menor que os valores de 2014. A geração hidráulica em 2015, incluindo-se a importação de Itaipu, foi responsável por 64% da OIEE (EPE, 2016). Assim, levando-se em consideração o quadro de mudanças climáticas e a intensificação dos eventos extremos, com destaque para a continuidade do baixo regime de chuvas, urge rever nossa matriz energética de forma a reduzir a elevada participação da hidroeletricidade, avaliando-se, regionalmente, as opções mais economicamente atrativas, socialmente desejáveis e ambientalmente sustentáveis.

Fonte de Energia	*2013*	*2016*
Não-renovável	**20,7%**	**18,5%**
Gás Natural	*11,3%*	*8,4%*
Derivados de Petróleo	*4,4%*	*6,4%*
Carvão Mineral	*2,6%*	*2,4%*
Nuclear	*2,4%*	*1,3%*
Renovável	**79,3%**	**81,5%**
Biomassa	*7,6%*	*8,9%*
Eólica	*1,1%*	*6,0%*
Hidráulica	*70,6%*	*66,6%*

Tabela 1 - Participação das fontes na matriz de energia elétrica do Brasil - Fonte: ANEEL (2016)

O Brasil desfruta de condições naturais privilegiadas para a produção de biomassa:

- grande extensão territorial, aproximadamente 8,5 × 106 km², dos quais cerca de 9% (76,6 milhões ha) estão ocupados por culturas anuais perenes e florestas plantadas, dispondo-se ainda de mais 12% (102 milhões ha) para o estabelecimento de novas lavouras (BUENO et al., 2015);

- clima tropical (precipitação média anual de 1.997 ± 504 mm e temperatura média de 24,4 ± 3,2º C), com elevada incidência de radiação solar - variando de 4.500 a 6.300 W h m^{-2} dia^{-1}, decorrente de sua localização geográfica, que se estende de 10º N a 30º S (2006; ALVARES et al., 2013, PEREIRA et al., 2006; HIJMANS et al.);

- grande variedade de espécies nativas e exóticas com alto potencial para produção de biomassa energética, algodão, amendoim, coco, dendê, eucalipto, girassol, macaúba, mamona, milho e soja (GAZZONI, 2006);

- sólido conhecimento científico e tecnológico sobre agricultura dos trópicos, resultantes do desenvolvimento de programas de silvicultura clonal (eucalipto, pinus) e de melhoramento genético de culturas agrícolas (soja, milho), permitindo ganhos expressivos de produtividade.

Ademais, o país dispõe de políticas públicas voltadas para consolidação e aumento da participação de fontes renováveis em sua matriz energética (PEREIRA JR. et al., 2011; PEREIRA JR. et al., 2013), destacando-se os investimentos em pesquisas (estudos econômicos, zoneamento edafoclimático, melhoramento genético, logística de transporte) para aumentar a competitividade da agricultura de energia no mercado internacional (GAZZONI, 2006; FERREIRA-LEITÃO et al., 2010; ALVARES et al., 2013).

A utilização da biomassa como fonte de energia renovável tem sido um desafio para países em desenvolvimento (FREPPAZ et al., 2004). A principal exigência para a produção dedicada à bioenergia é a disponibilidade de terra e de água.

Consequentemente a competição com a produção de alimentos é um aspecto crucial para se determinar com segurança, o potencial atingível para a produção de bioenergia (FISCHER e SCHARTTENHOLZER, 2001; VOIVONTAS et al., 2001; PEREIRA JR. et al., 2013). Isto explica o crescente interesse nos estudos acerca do uso de resíduos agrícolas para a produção de energia renovável (RANTA, 2005; LORA e ANDRADE, 2009; MIURA et al., 2011).

A biomassa para produção de energia, quanto à sua origem, enquadra-se nas seguintes categorias (EPE, 2008):

- florestal (produtos, subprodutos e resíduos);
- agrícola (culturas energéticas dedicadas, subprodutos e resíduos);
- resíduos urbanos.

A disponibilidade de biomassa para projetos de produção de energia apresenta elevada dependência espacial, dada a grande diversidade edafoclimática do território brasileiro. Isso implica que a lucratividade de uma usina estará fortemente ligada à sua localização. As plantas de bioenergia requerem uma quantidade adequada de biomassa para satisfazer, ao menor custo possível aos níveis projetados de demanda (PANICHELLI e GNANSOUNOU, 2008). Consequentemente os custos de transporte são de importância fundamental para qualquer projeto de energia da biomassa, devido as suas características intrínsecas, em que se destaca a baixa densidade energética quando comparada à de combustíveis fósseis. Logo, os projetos de bioenergia são particularmente sensíveis a esta variável. O estabelecimento de usinas de energia de biomassa em locais estratégicos, de modo a minimizar os custos de transporte, é um dos pilares da economia de biocombustíveis, ditando sua sustentabilidade (TENERELLI e MONTELEONE, 2008; KHACHATRYAN et al., 2010; SULTANA e KUMAR, 2012; PEREIRA JR. et al., 2013).

Assim, é imprescindível dispor de uma base de dados confiáveis, contemplando a distribuição espacial e temporal da oferta de biomassa. O estado de Minas Gerais, com os recentes avanços técnico-científicos na área de geração de bioeletricidade, chama para si a responsabilidade de promover a segurança energética necessária ao crescimento de suas indústrias, ao mesmo tempo em que almeja a redução das disparidades socioeconômicas regionais, sem se descuidar das questões ambientais. O presente estudo teve, por objetivo, produzir o Atlas de Biomassa de Minas Gerais. Os dados coletados e gerados, com relação a caracterização geográfica, área plantada, produção e potencial energético, serão apresentados ao longo do Atlas.

Capítulo 2

2 - Agrometeorologia de Minas Gerais

2.1 Caracterização Geográfica

2.1.1 Relevo

2.1.2 Solos

2.1.3 Hidrografia

2.1.4 Vegetação

2.2 Climatologia de Minas Gerais

2.2.1 Classificação Climática de Köppen

2.2.2 Caracterização da Estação Chuvosa

2.2.3 Temperatura do Ar

2.3 Zoneamento Climático

Minas Gerais, em função de sua localização geográfica, relevo, continentalidade, variabilidade de biomas e fitofisionomias, apresenta condições termodinâmicas que resultam em diferentes regimes de chuvas. As regiões Norte e do Vale do Jequitinhonha apresentam baixos índices pluviométricos com grandes impactos socioeconômicos e culturais. A migração da população mais jovem em busca de oportunidades em outras regiões do país, principalmente nas plantações de cana-de-açúcar e na construção civil, é resultante dos riscos climáticos que dificultam a sobrevivência da população nas áreas rurais. Por outro lado, a excelente distribuição pluviométrica verificada em algumas regiões contribui para a grande vocação agrícola e pecuária de Minas Gerais.

As chuvas incidentes no estado são responsáveis pela formação de importantes bacias hidrográficas que se originam em Minas Gerais, como a do São Francisco, Rio Paraná (Rio Grande), Atlântico Sudeste (Rio Doce) e Atlântico Leste (Rio Jequitinhonha).

A caracterização dos índices pluviométricos é de grande importância para a busca de soluções referentes à falta ou ao excesso das chuvas, bem como para a definição das melhores alternativas de uso dos recursos hídricos em prol da comunidade.

2.1 - Caracterização Geográfica

O estado de Minas Gerais é uma das 27 unidades federativas do Brasil. Com uma área de 586.528 km², ocupa o quarto lugar no país em extensão territorial. Situa-se entre 14º13'58" e 22º54'00" de latitude sul (os paralelos são 14º e 22º) e 39º51'32" e 51º02'35 de longitude a oeste de Greenwich. De acordo com o censo de 2010 efetuado pelo IBGE, o estado conta atualmente com uma população de 19.159.260 habitantes distribuídos em 853 municípios sendo que apenas 176 contam com populações superiores a 20.000 habitantes e 12 com populações superiores a 200.000 habitantes. Belo Horizonte apresenta uma população de 2.258.096 e é hoje a sexta cidade mais populosa do país. Situada na região Sudeste do Brasil, Minas Gerais tem como estados limítrofes a Bahia ao norte e nordeste, Espírito Santo a leste, Rio de Janeiro a sudeste, São Paulo ao sul e sudeste, Mato Grosso do Sul a oeste, Goiás e Distrito Federal a noroeste. A distância linear entre os pontos extremos do estado é de 986 km no sentido norte-sul e de 1.248 km no sentido leste-oeste. As divisões regionais envolvem 12 mesorregiões (Campo das Vertentes, Central Mineira, Jequitinhonha, Metropolitana de Belo Horizonte, Noroeste de Minas, Norte de Minas, Oeste de Minas, Sul/Sudoeste de Minas, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Vale do Mucuri, Vale do Rio Doce e Zona da Mata) e 66 microrregiões. A posição geográfica do estado, aliada ao fator de continentalidade, contribui para a determinação dos sistemas regionais de circulação atmosférica que determinam as condições climáticas locais. As Figuras 2 e 3 mostram a localização geográfica do Brasil e de Minas Gerais.

Figura 2 - Brasil - Fonte: Os autores

Figura 3 - Localização do estado de Minas Gerais - Fonte: Os autores

2.1.1 - Relevo

Além da posição geográfica e da situação em relação ao nível do mar (continentalidade), o relevo constitui outro fator estático de grande influência na climatologia do estado. Conhecida como "Terra das Alterosas" em função de seu relevo acidentado, Minas Gerais tem uma topografia de grande diversidade morfológica, apresentando vales formados pelas bacias hidrográficas, planaltos cristalinos e áreas serranas. A Figura 4 mostra o relevo do estado de Minas Gerais representado por imagens geradas pelo radar SRTM-3 (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA.

A Serra do Espinhaço estende-se desde o município de Ouro Branco em Minas Gerais, até Xique-Xique na Bahia, onde recebe a denominação de Chapada Diamantina. O chamado Quadrilátero Ferrífero, situado na região do Espinhaço Meridional, engloba 34 municípios. Essa área, que tem a maior densidade populacional do estado, teve enorme importância socioeconômica na formação da nação brasileira. Durante o século XVIII, cerca da metade do ouro produzido no mundo era proveniente dessa região e atualmente são exploradas enormes jazidas de minério de ferro. A região abriga importantes cidades, como a capital Belo Horizonte, Ouro Preto, Mariana, Congonhas, Sabará, João Monlevade e Itabira. O relevo, denominado "mar de morros", apresenta importantes serras, como as do Curral, em Belo Horizonte; do Caraça, do Rola Moça; da Piedade, do Itacolomi, da Moeda, do Mascate e a Serra Azul. Na região setentrional, as mais conhecidas são as Serras do Cipó, Itambé, do Cabral e a Serra Geral. Na Serra do Cipó localiza-se a famosa cachoeira do Tabuleiro, cujos 273 metros de queda livre fazem dela a maior do estado e a terceira cachoeira mais alta do Brasil.

Depressões do rio São Francisco - 01
Chapada do rio São Francisco - 02
Serra do Cabral - 03
Planalto de Uberlândia - 04
Rio Paranaíba- 05
Rio Grande - 06
Serra da Canastra - 07
Serra da Saudade - 08
Depressão de Belo Horizonte - 09
Serra da Mantiqueira - 10
Serras do Quadrilátero Ferrífero - 11
Serra do Cipó - 12
Serra do Espinhaço - 13
Serra do Caparaó - 14
Planalto do rio Jequitinhonha - 15

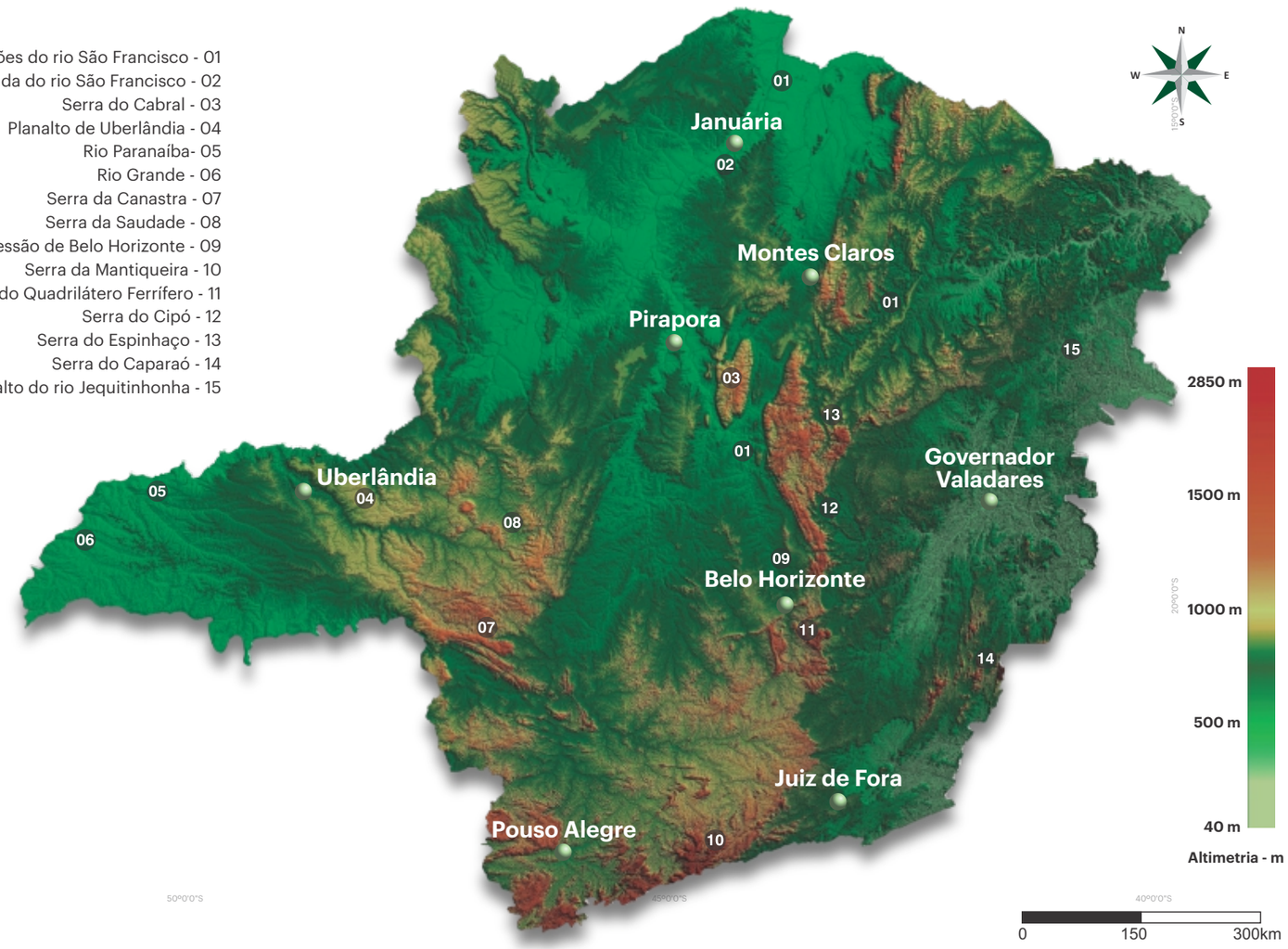


Figura 4 - Mapa altimétrico de Minas Gerais - Fonte: Os autores

2.1.2 - Solos

O solo constitui a camada superficial da crosta terrestre e apresenta alta variabilidade em função do material de origem, do intemperismo climático e da atuação de seres vivos. A ação e a interação desses agentes transformadores determinam o tipo de perfil dos solos, normalmente resultando em camadas denominadas de horizontes. Os espaços vazios entre as partículas do solo são chamados de poros e são responsáveis pelos índices de aeração e retenção da água infiltrada após a ocorrência de chuvas. A capacidade de retenção de água pelos solos depende da textura, estrutura, profundidade e teor de matéria orgânica.

Por se tratar de uma estrutura aberta para a atmosfera e as camadas mais profundas do subsolo, a água nesse ambiente apresenta-se em constante processo de mudança. A dinâmica dos fluxos de água no solo é analisada pelos modelos denominados de pedotransferência. Após atingir o ponto de saturação, em que os poros são preenchidos pela água de infiltração, iniciam-se os processos de escoamento superficial (enxurradas) e percolação para as camadas mais profundas que irão abastecer os lençóis subterrâneos. A Figura 5 mostra os tipos de solos em Minas Gerais.

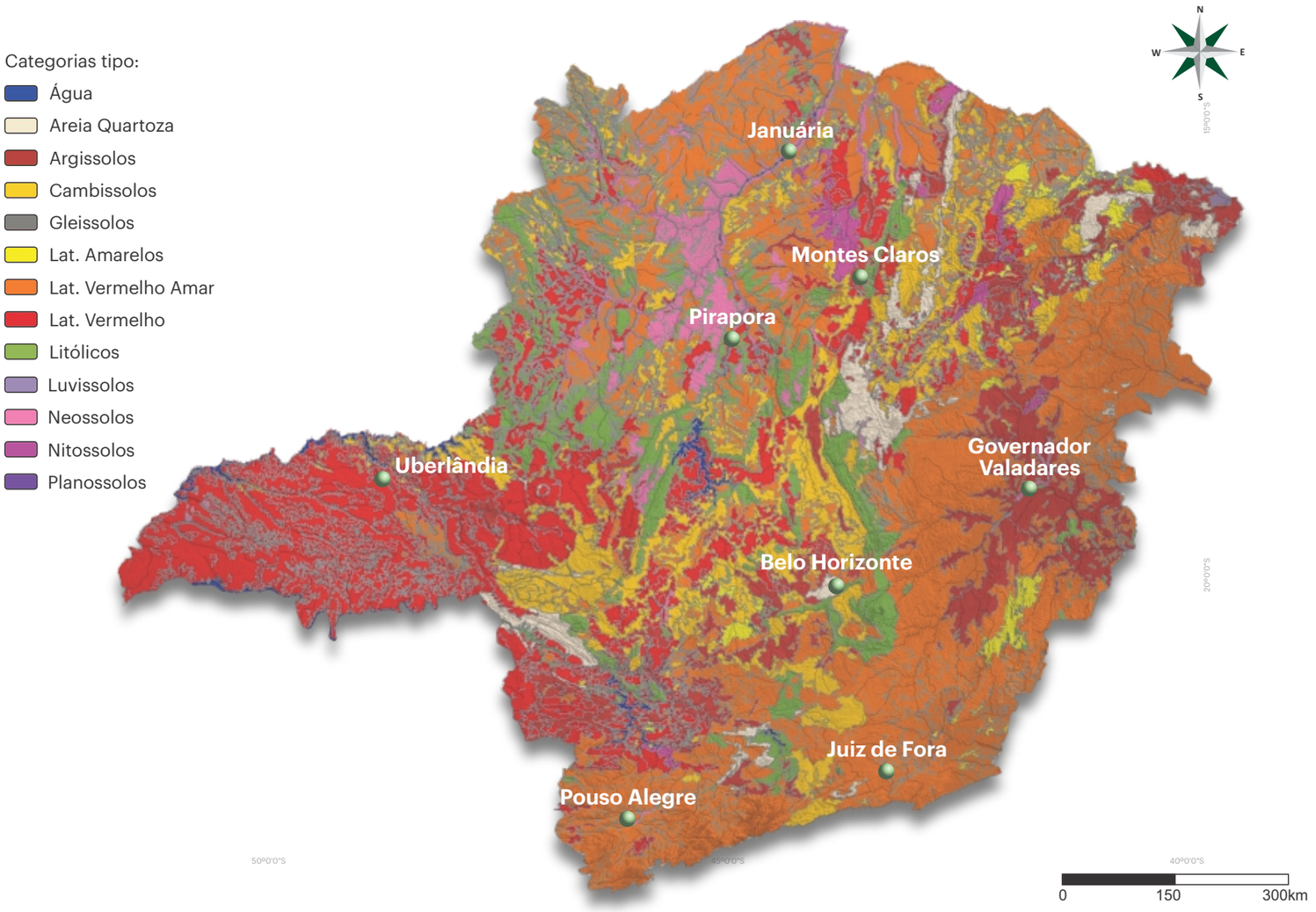


Figura 5 - Mapa de Solos de Minas Gerais - Fonte: Os autores

2.1.3 - Hidrografia

Importantes bacias hidrográficas estão localizadas no estado de Minas Gerais. A bacia do São Francisco drena as águas de uma área equivalente à metade do estado, compreendendo as regiões Norte, Noroeste, Central, Oeste e Metropolitana de Belo Horizonte. Além do Rio São Francisco, são importantes formadores da bacia hidrográfica os Rios Pará, Paraopeba, das Velhas, Paracatu e Verde Grande. As sub-bacias dos Rios Grande e Paranaíba são as formadoras iniciais da bacia do Paraná, principal fonte de energia elétrica do país. No estado, localizam-se no Rio Grande as represas de Camargos, Itutinga, Funil e Furnas e na bacia do Paranaíba as represas de Emborcação, Nova Ponte, Miranda, Capim Branco, Itumbiara, Cachoeira Dourada e São Simão. São drenadas as águas provenientes de uma pequena porção da Zona da Mata e das regiões do Campo das Vertentes, Sul/Sudoeste de Minas, partes das regiões Oeste e Triângulo/Alto Paranaíba. A bacia do Rio Paraíba do Sul, cujas nascentes principais se encontram em áreas de relevo acidentado das serras da Mantiqueira e do Mar, estende-se pelas regiões mais industrializadas e povoadas do Brasil, abrangendo o Vale do Paraíba Paulista, a Zona da Mata de Minas Gerais e grande parte do estado do Rio de Janeiro. A bacia do Vale do Rio Doce, cujas nascentes se localizam na Serra da Mantiqueira, é a principal bacia hidrográfica totalmente inserida na região Sudeste do Brasil e sua rede de drenagem inclui parte da Zona da Mata, Região Metropolitana de Belo Horizonte e Vale do Rio Doce. O Rio Doce constitui também o mais importante recurso de água doce do Espírito Santo, onde deságua no oceano Atlântico. A bacia do Rio Jequitinhonha tem suas nascentes na Serra do Espinhaço e se estende pelo Vale do Jequitinhonha, uma das regiões mais pobres do país, e parte do estado da Bahia. O Rio Araçuaí é o afluente mais importante do Jequitinhonha. O desmatamento e o garimpo causam enormes danos ambientais nessa bacia hidrográfica. A bacia do Rio Mucuri abrange apenas 13 municípios, sendo os mais importantes; Teófilo Otoni, Carlos Chagas e Nanuque. Outras bacias ocorrentes no estado são as dos Rios Buranhém, Itabapoana, Itanhém, Itapemiririm, Jucuruçu, Pardo, Piracicaba/Jaguari e São Mateus.

2.1.4 - Vegetação

As condições climáticas, o relevo e as condições edáficas (solos) determinam diferentes tipos de vegetação no estado de Minas Gerais. O bioma Cerrado, com suas diferentes fitofisionomias, constitui a principal tipologia vegetal ocorrente e está associado às áreas de chapadas e dos latossolos com altos teores de alumínio e baixa fertilidade natural. São espécies típicas desse tipo de vegetação: o pequi (*Caryocar brasiliense*), o araticum (*Anonna crassifolia*), o barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*), o pau-terra (*Qualea grandiflora*), o buriti (*Mauritia flexuosa*) e a cagaita (*Eugenia dysenterica*). De acordo com as dimensões das árvores e a densidade de plantas por unidade de área, a vegetação recebe diferentes denominações como Cerradão, Cerrado (*stricto sensu*) e Campo Sujo. Outras características marcantes das áreas com esse tipo de vegetação são a alta incidência de incêndios no período de estiagem e o desmatamento para a produção de carvão vegetal. Verifica-se também frequentemente a abertura de áreas para exploração agrícola, pecuária ou para as atividades de reflorestamento.

A Mata Atlântica constitui outro importante bioma ocorrente em Minas Gerais, porém, a exemplo do que acontece com os demais biomas, vem sofrendo forte degradação. Ocorre principalmente na região Leste do estado e é caracterizada pelo alto índice de espécimes endêmicas da fauna e flora. Originalmente a Mata Atlântica ocupava a segunda maior área de vegetação do estado, mas atualmente se restringe a pequenos fragmentos florestais, exceto no Parque do Rio Doce, onde ainda se encontra preservada uma área de cerca de 37 mil hectares. As áreas de Caatinga e Florestas Semidecíduas das regiões Norte de Minas são caracterizadas pela transição para o clima semiárido, com a ocorrência de altas temperaturas, precipitação média anual inferior a 1.000 mm e estação seca pronunciada. Os Campos Rupestres de Altitude ocorrem principalmente em cotas acima de 900 metros e são encontrados sobretudo nas serras do Espinhaço e da Canastra. Em levantamento realizado pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF-MG) e a Universidade Federal de Lavras (UFLA-MG) indicou a seguinte proporção de áreas vegetadas em relação à área do estado: Cerrado (13,72%), Mata Atlântica (0,40%), Floresta Decídua (2,84%), Caatinga (9,29%), Campos Rupestres (1,05%), campos (6,41%), reflorestamentos (2,07%).

2.1.5 - Evapotranspiração

A evapotranspiração diária anual é maior nas regiões do Triângulo, Norte, Noroeste, nos Vales do Jequitinhonha, Mucuri e Rio Doce. Os maiores valores diários ocorrem no período do outono e primavera, quando o ar se encontra mais seco nestas regiões. A Figura 6 mostra a estimativa diária da evapotranspiração diária em Minas Gerais.

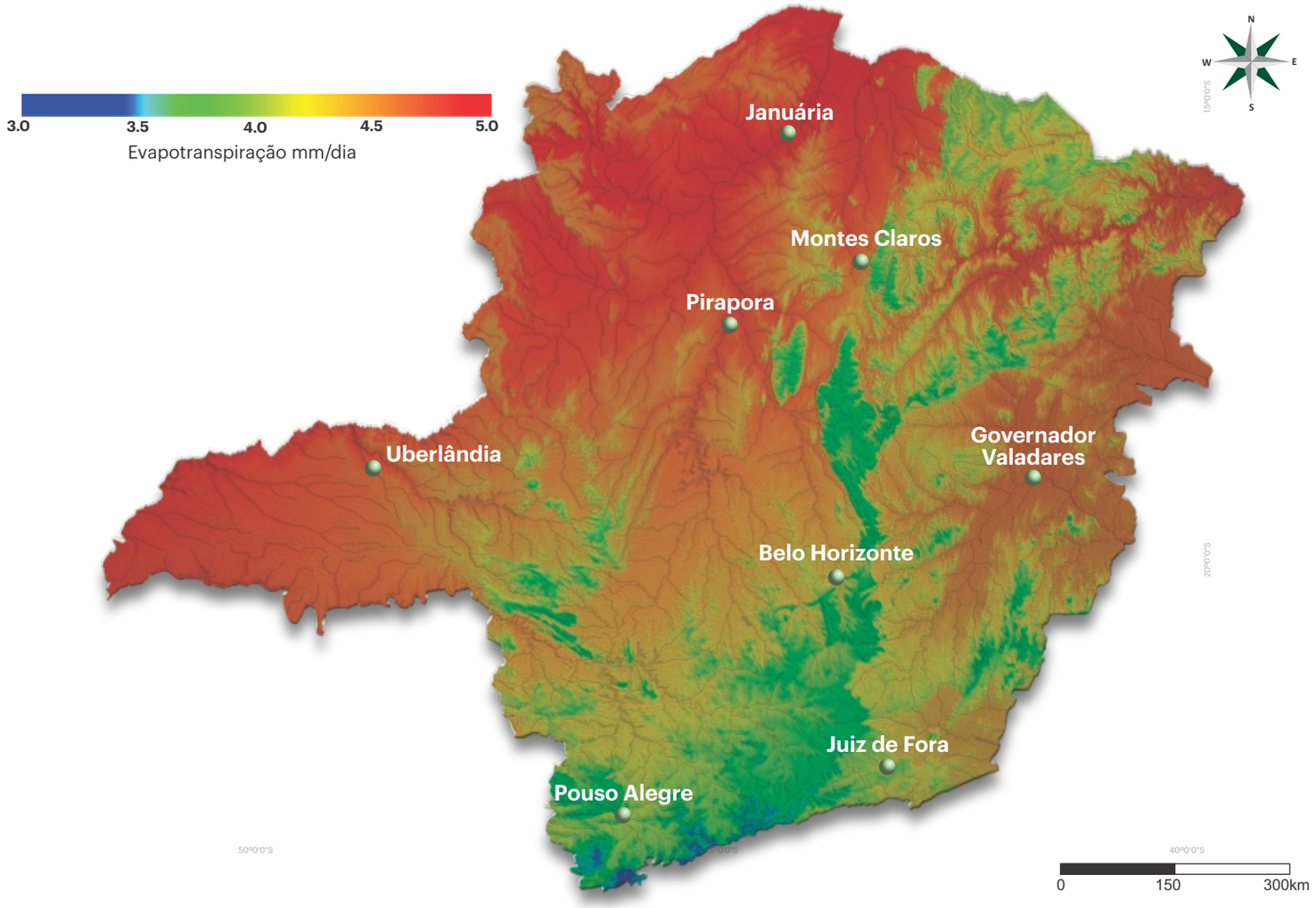


Figura 6 – Evapotranspiração diária em Minas Gerais - Fonte: Os autores

2.2 - Climatologia de Minas Gerais

2.2.1 - Classificação climática de Köppen

Embora tenha sido proposto há mais de um século, o sistema de classificação climática de Köppen, por sua robustez e facilidade de uso, ainda continua sendo largamente utilizado em todo o mundo, tornando-se um poderoso instrumento para nos ajudar a compreender melhor o ambiente que nos cerca (PEEL et al., 2007). Esse sistema utiliza apenas variáveis climáticas (temperatura e precipitação) e geográficas (altitude e latitude), de fácil obtenção, para definir zonas climáticas homogêneas.

Com base nestes dados, pode-se observar que a temperatura média dos 853 municípios Minas Gerais, foi de 20,83 ± 0,04°C, a precipitação média anual foi de 1.325,5 ± 2,2 mm e, a altitude média, 733,7 ± 1,2 m. Estas médias foram ponderadas pelas áreas dos municípios.

Analisando-se a Figura 7, pode-se observar que Minas Gerais está igualmente dividida em dois tipos climáticos: A – tropical (49,9%) e Cw – subtropical úmido com inverno seco (49,5%). Os 0,6% restantes do estado estão sob o domínio do clima Cf (subtropical úmido oceânico sem estação seca). Os 853 municípios foram então agrupados de acordo com a zona climática a que pertencem, dissolvendo-se os limites internos de seus perímetros.

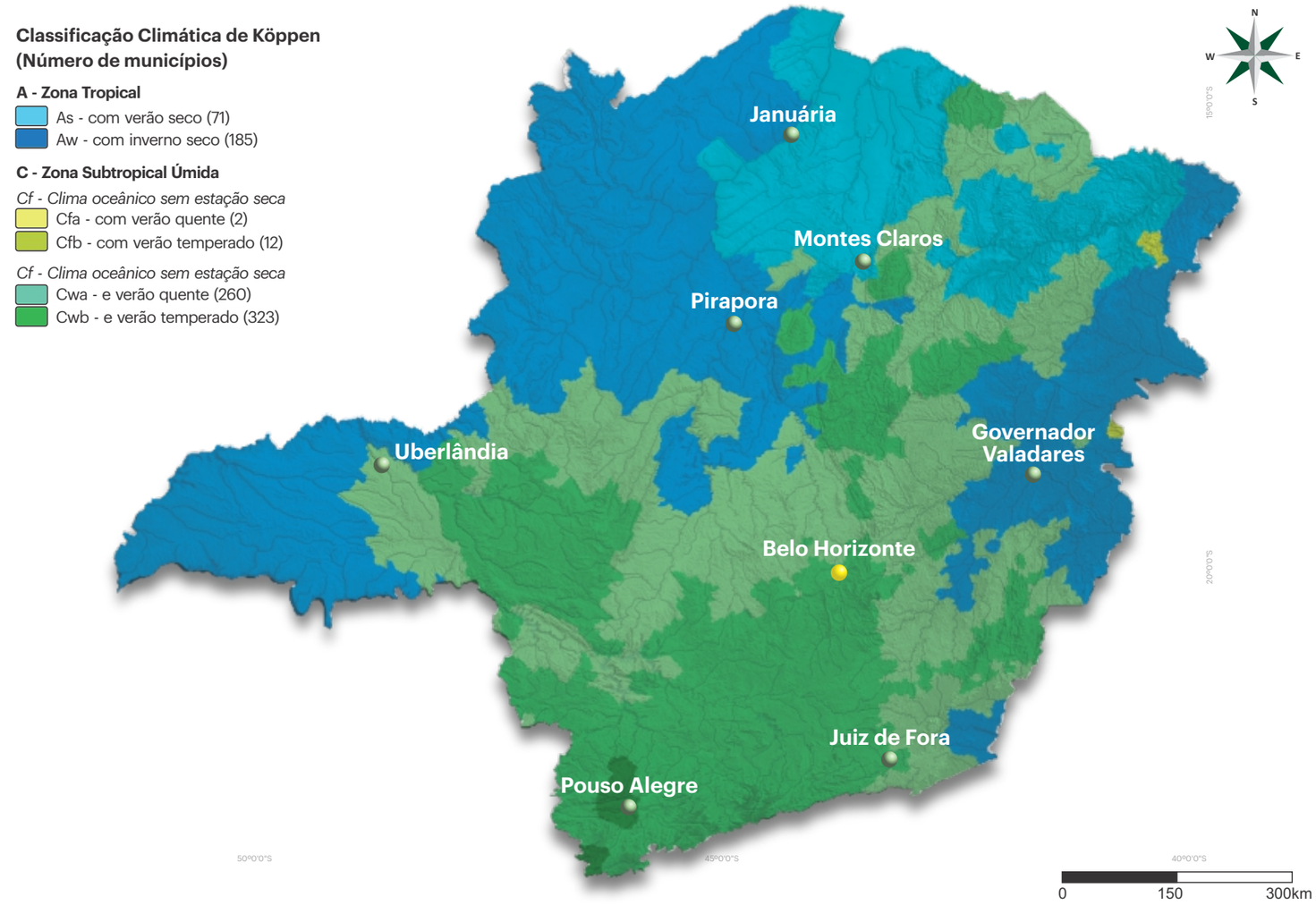


Figura 7 - Distribuição espacial das classes climáticas de Köppen para Minas Gerais. - Fonte: Os autores.

2.2.2 - Caracterização da estação chuvosa

A distribuição unimodal das chuvas em Minas Gerais permite o ajuste de distribuições probabilísticas para as análises de tendência das distribuições. Embora a distribuição Gama tenha sido frequentemente usada para descrever as tendências de precipitação, Catalunha et al. (2002) mostram que a distribuição Weibull apresenta melhor aderência aos dados de precipitação no estado de Minas Gerais em comparação aos modelos exponencial, gama, log-normal e normal.

A função Weibull (1951) foi selecionada para ajustar as tendências de distribuição mensal das chuvas, em função de sua alta flexibilidade e reduzido número de parâmetros. Optou-se pelo modelo de 3 parâmetros pelo fato de as chuvas serem escassas no período de inverno. Sua forma derivativa é dada por:

$$f(x) = \omega * \beta * \gamma * \chi^{(\gamma-1)} * (e(-\beta * \chi^{\gamma}))$$

Na função, **f(x)** representa a precipitação esperada no período (no caso = precipitação mensal), ω refere-se ao parâmetro assintótico (representando a precipitação média anual), β corresponde à taxa de expansão da distribuição, γ é o parâmetro definidor do ponto de inflexão que irá determinar o grau de assimetria da distribuição, χ corresponde ao mês do ano e e à base dos logaritmos neperianos.

O início e o final do ciclo das chuvas foram definidos considerando-se o ponto em que a taxa instantânea de precipitação determinada pela função Weibull atingisse 100 mm/mês.

A espacialização dos ciclos das chuvas em Minas Gerais foi efetuada usando-se o procedimento geoestatístico de krigagem ordinária simples. As Figuras 8, 9 e 10 mostram o período de início, término e duração do período chuvoso em Minas Gerais.

As Figuras 11 a 22 mostram a precipitação média mensal em Minas Gerais. Pode-se observar que os maiores volumes de chuvas ocorrem nas regiões Oeste, Sul, Zona da Mata, Central e Triângulo. O município de Bocaina de Minas (região Sul) é o que apresenta o maior volume de precipitação média anual, 2.100 mm/ano. Enquanto que o município de Porteirinha, região norte, é o que apresenta o menor índice pluviométrico anual, 650 mm/ano. A precipitação média anual para o estado pode ser observada na Figura 23.

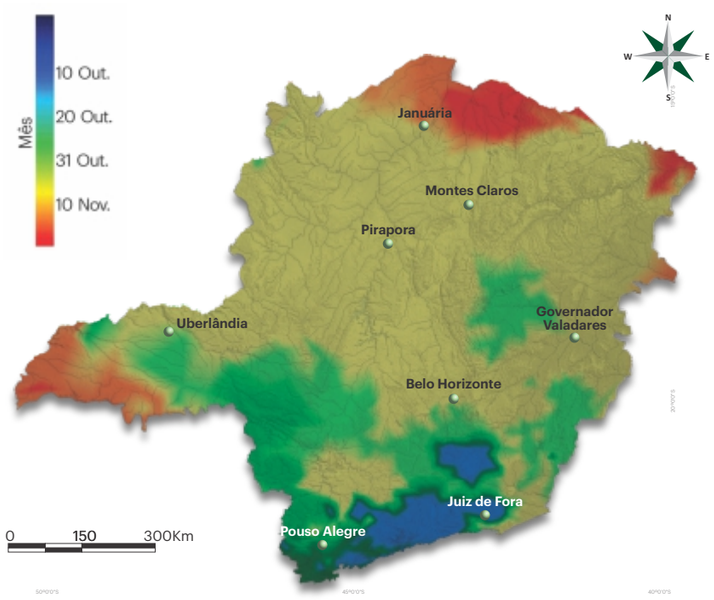


Figura 8 - Início da estação chuvosa no Estado de Minas Gerais
Fonte: Os Autores

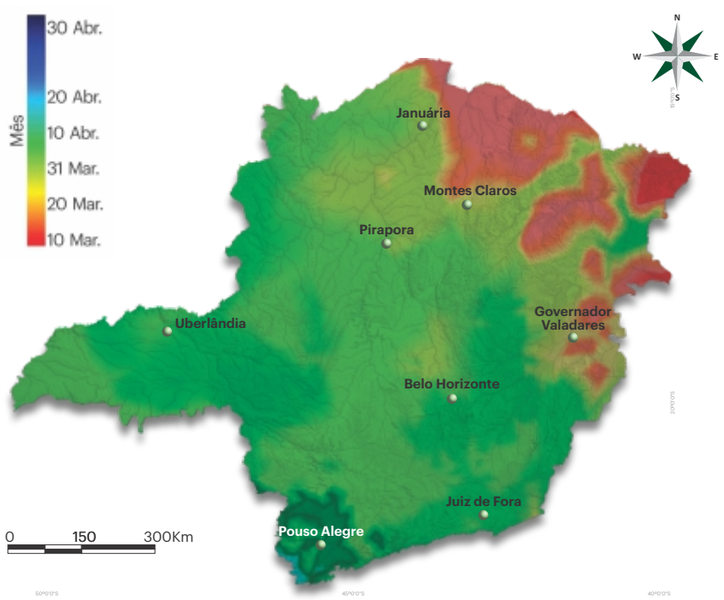


Figura 9 - Final da estação chuvosa no Estado de Minas Gerais
Fonte: Os Autores

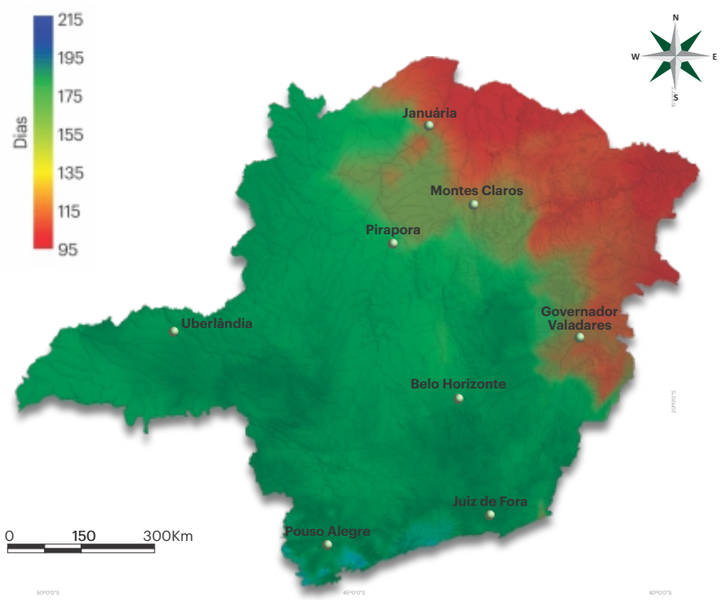


Figura 10 - Duração da estação chuvosa no Estado de Minas Gerais
Fonte: Os Autores

Precipitação média mensal no estado de Minas Gerais

Janeiro

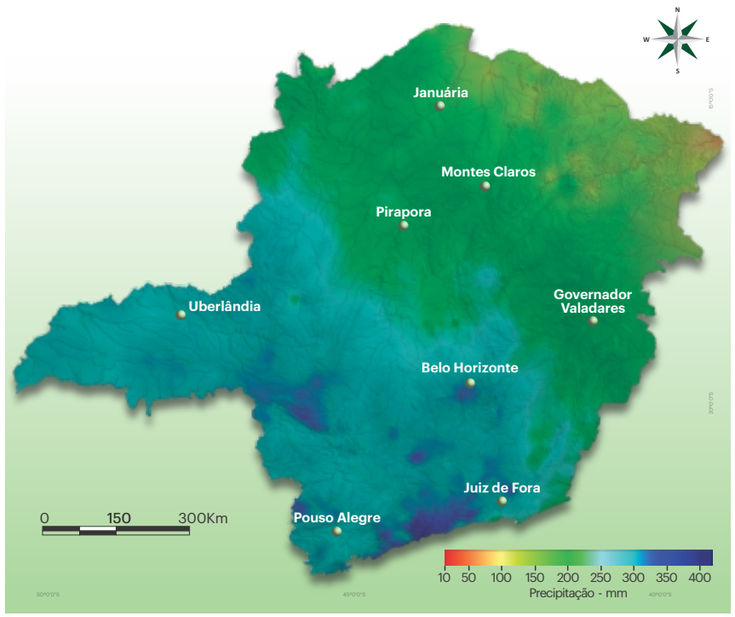


Figura 11 - Precipitação média em janeiro.

Fevereiro

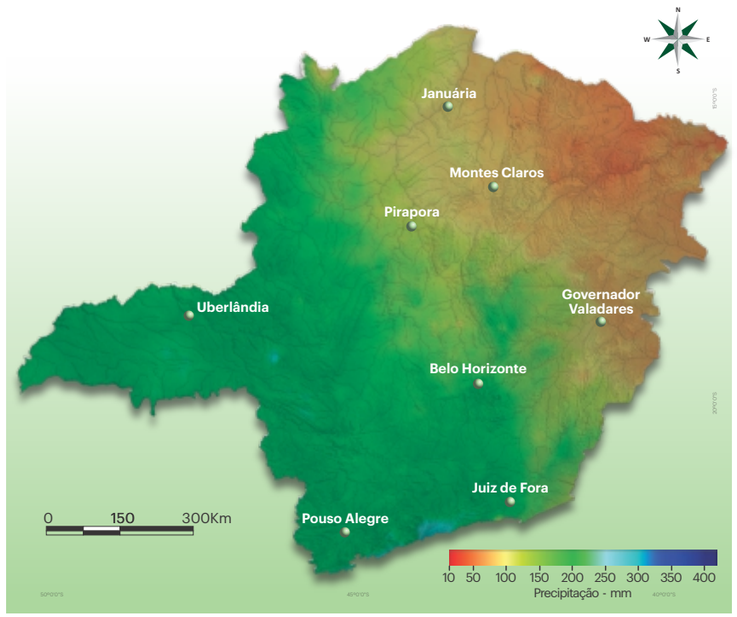


Figura 12 - Precipitação média em fevereiro.

Março

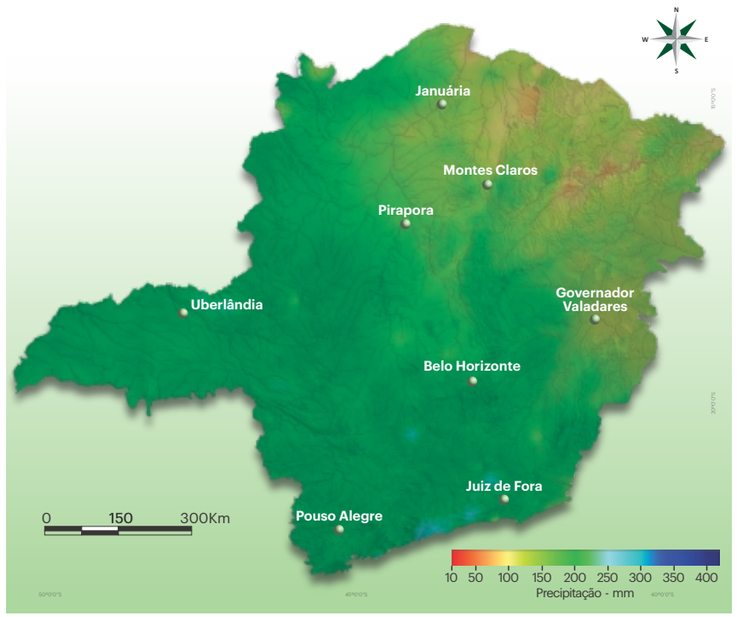


Figura 13 - Precipitação média em março.

Abril

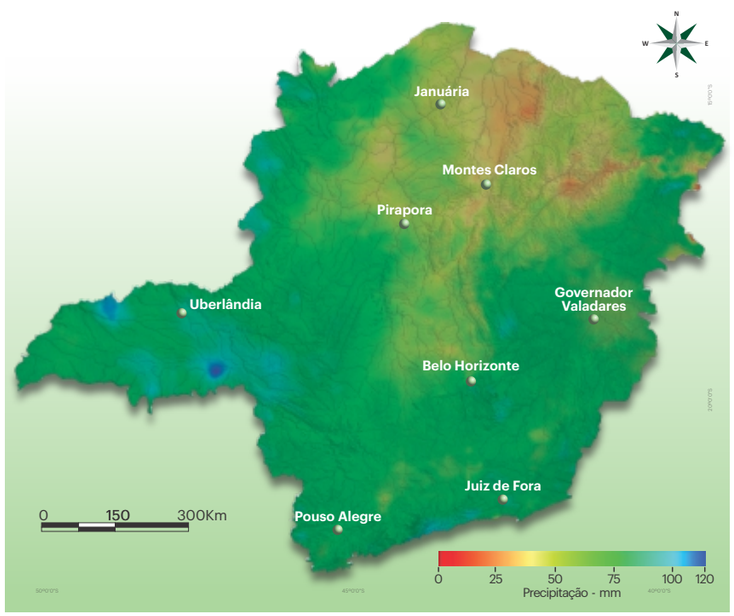


Figura 14 - Precipitação média em abril.

Maio

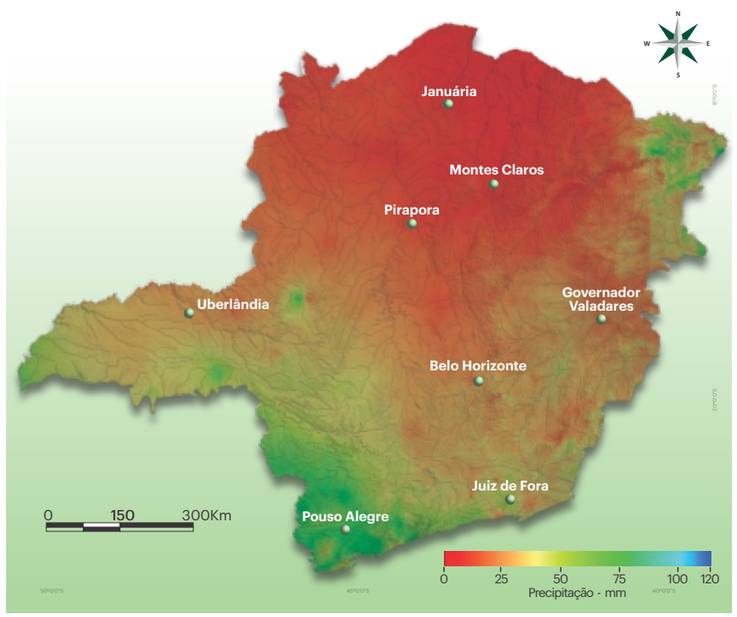


Figura 15 - Precipitação média em maio.

Junho

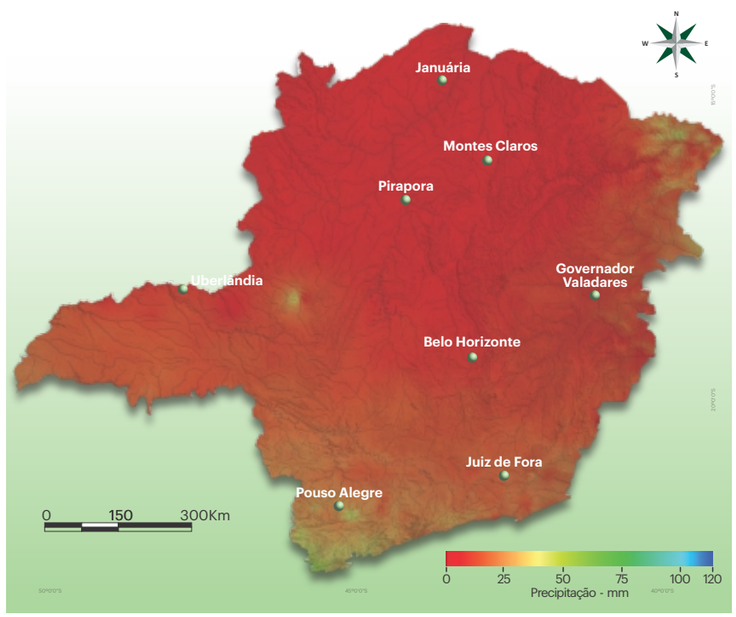


Figura 16 - Precipitação média em junho.

Fonte: Os Autores

Julho

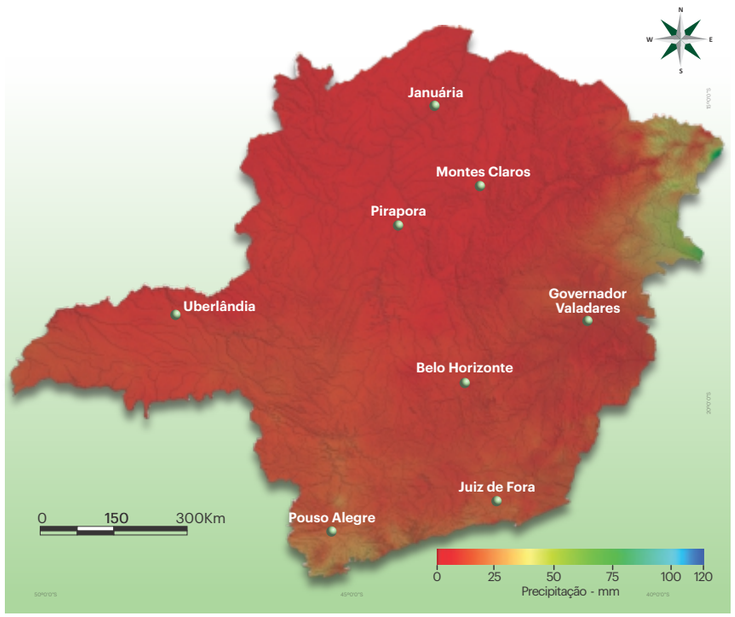


Figura 17 - Precipitação média em julho.

Agosto

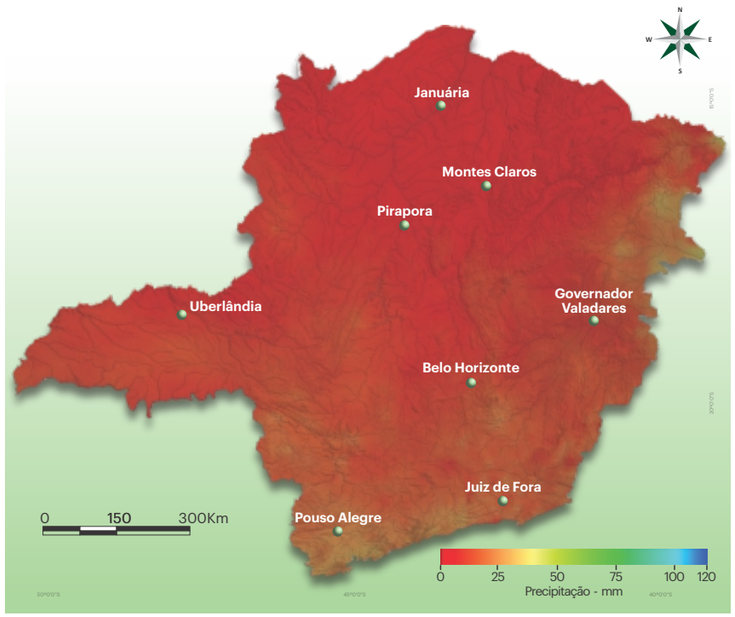


Figura 18 - Precipitação média em agosto.

Setembro

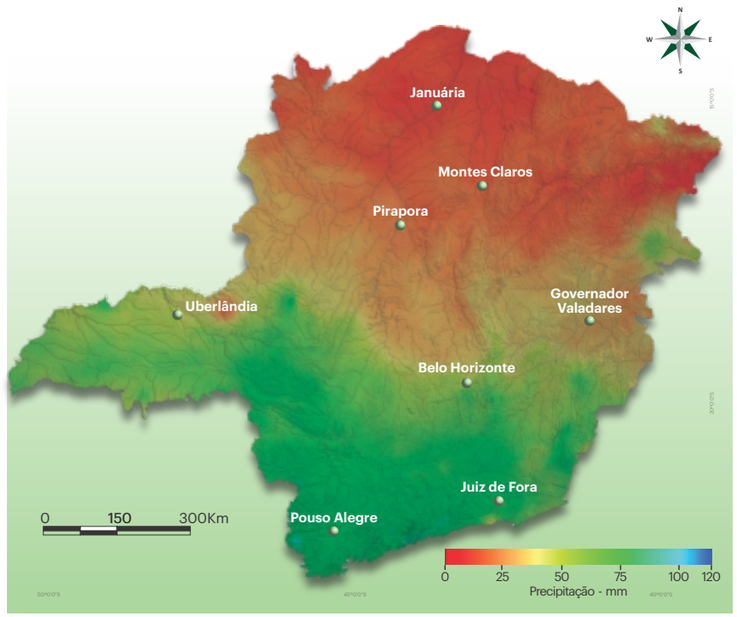


Figura 19 - Precipitação média em setembro.

Outubro

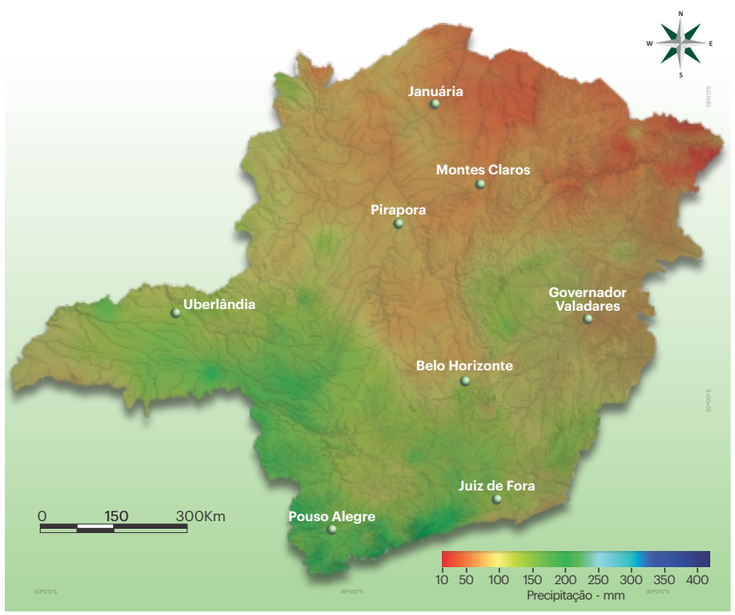


Figura 20 - Precipitação média em outubro.

Novembro

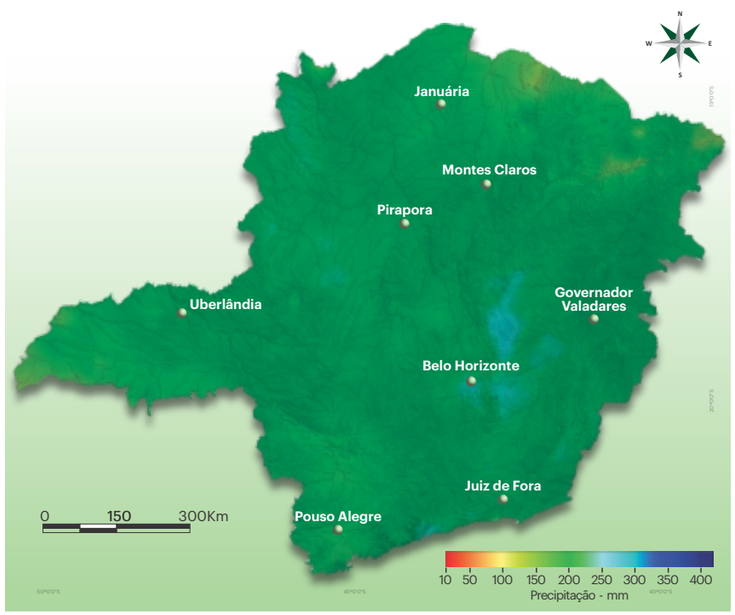


Figura 21 - Precipitação média em novembro.

Dezembro

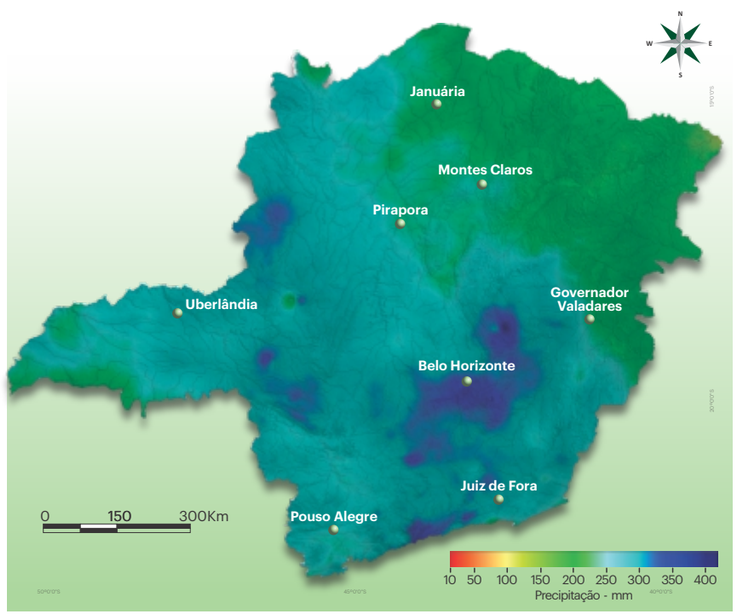
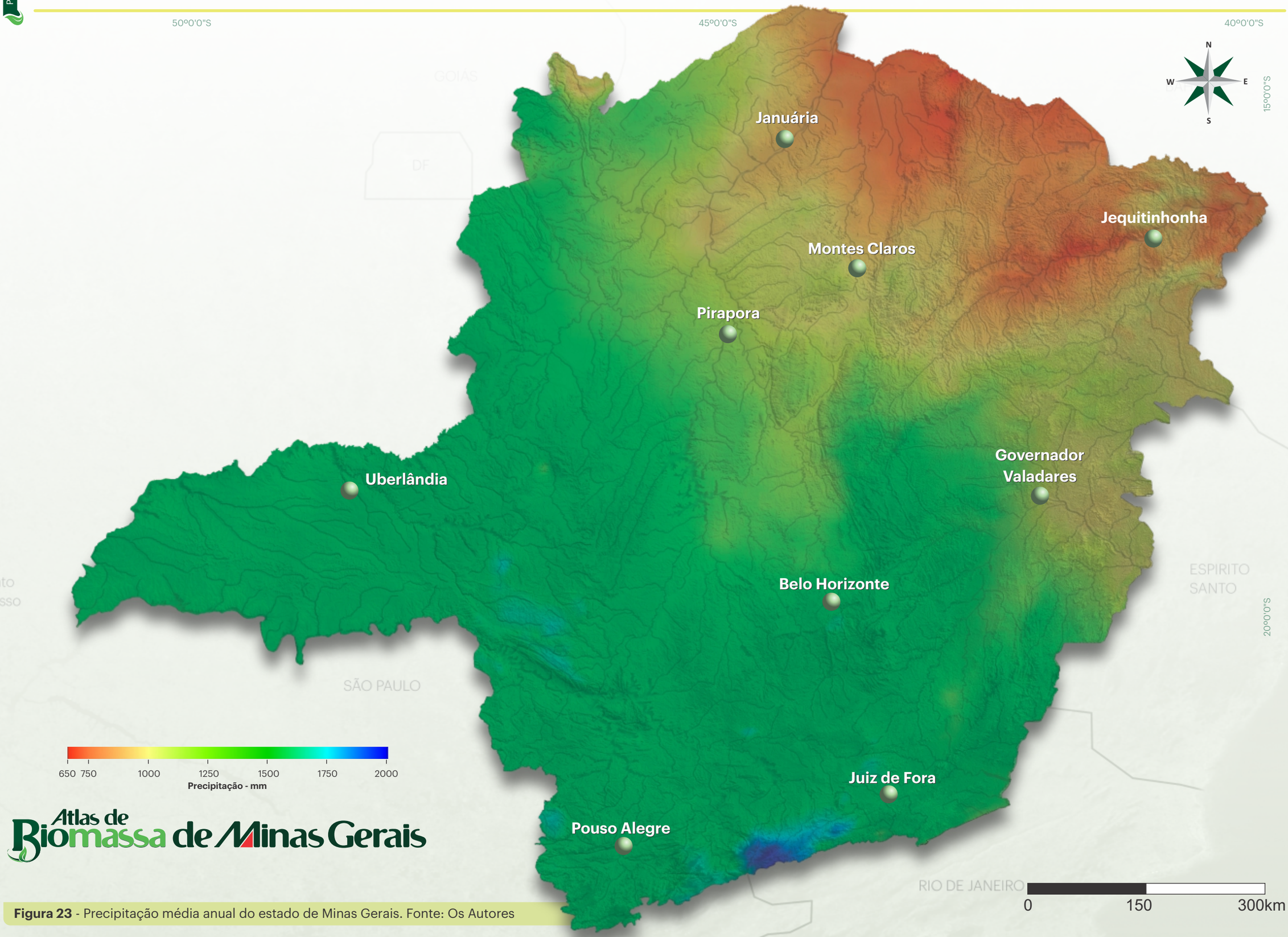


Figura 22 - Precipitação média em dezembro.

Fonte: Os Autores



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 23 - Precipitação média anual do estado de Minas Gerais. Fonte: Os Autores

2.2.3 - Temperatura do ar

A localização geográfica e o tipo de relevo exercem influência nas temperaturas no estado de Minas Gerais, onde predominam as maiores médias de temperatura máxima e mínima nas regiões Centro-Oeste, Noroeste e Triângulo. A variação da temperatura média anual nas áreas mais elevadas varia entre 17°C a 20°C. Já nas áreas de menor altitude, a temperatura média anual varia de 20°C a 23°C. As Figuras 24 e 25 apresentam a média das temperaturas máximas e mínimas anuais no estado de Minas Gerais com base nos dados obtidos por satélites.

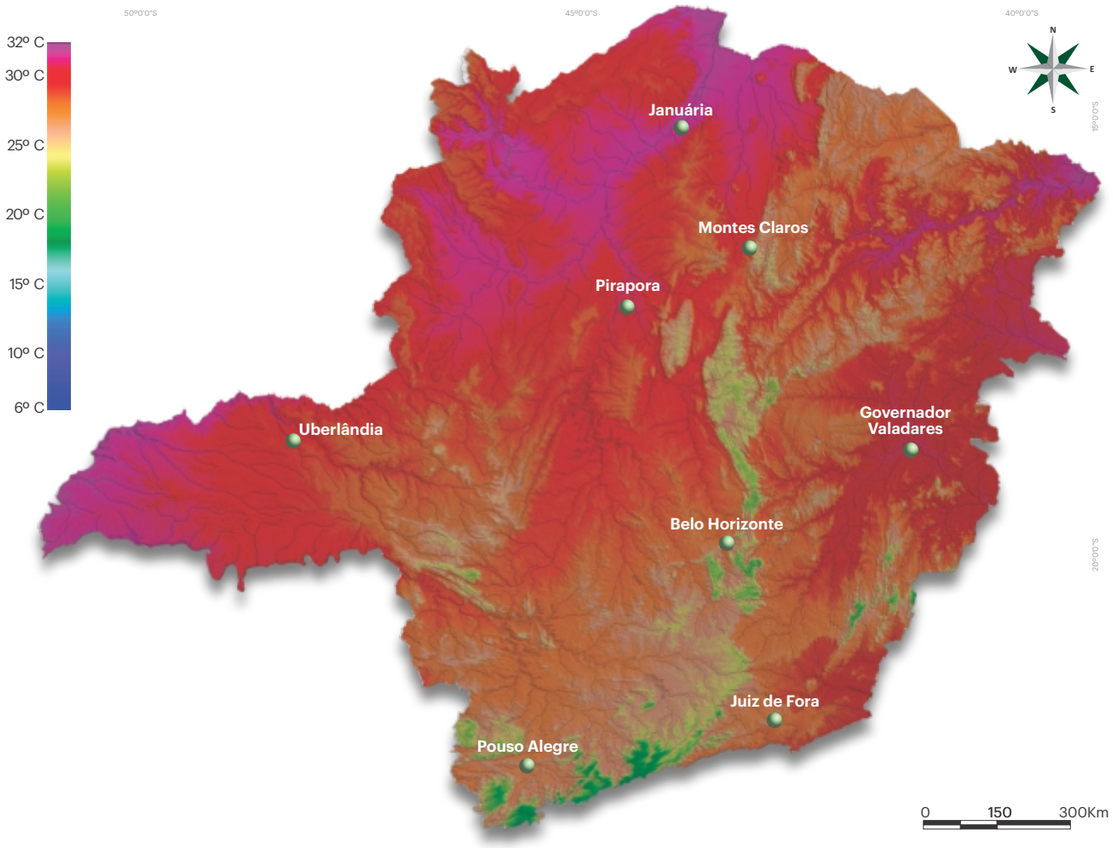


Figura 24 - Temperatura máxima média anual do Estado de Minas Gerais - Fonte: Os Autores

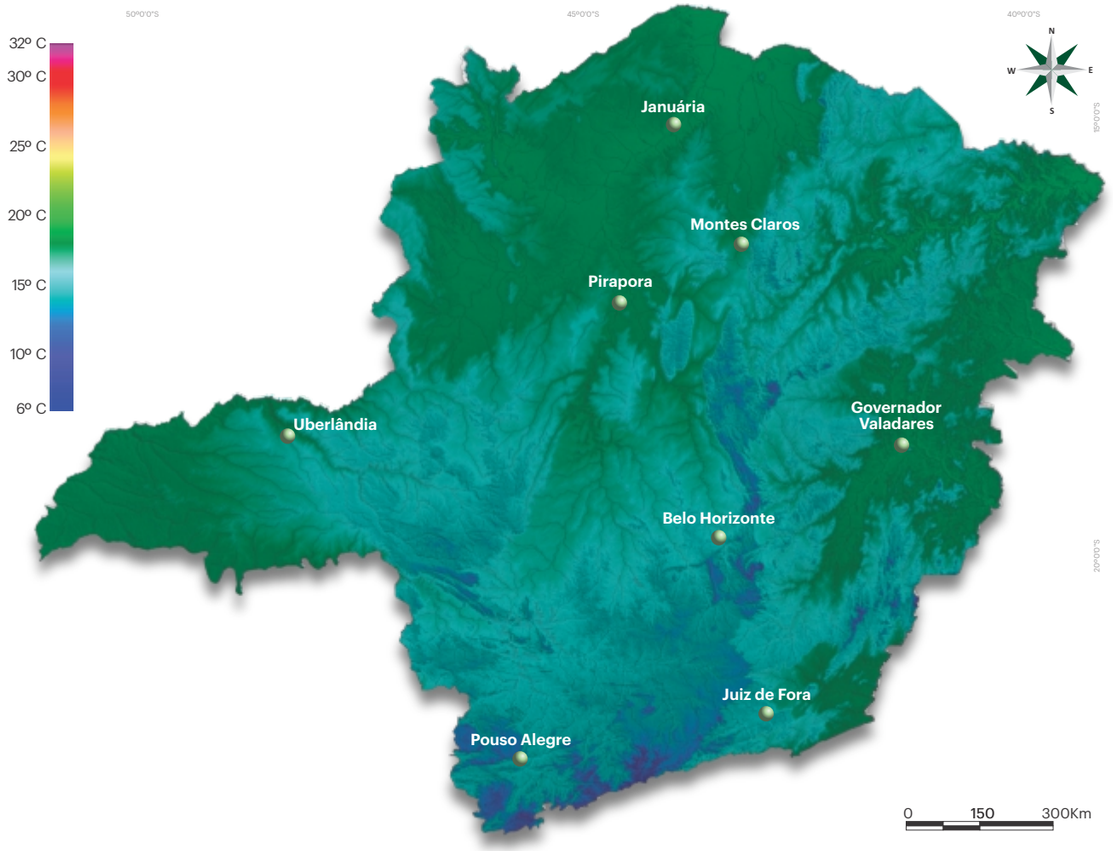


Figura 25 - Temperatura mínima média anual do Estado de Minas Gerais - Fonte: Os Autores

2.3 - Zoneamento Climático

O zoneamento agroclimatológico visa a delimitação de zonas apropriadas para o cultivo de culturas agrícolas de modo a minimizar os riscos de estresse das plantas em relação ao ambiente. Para isso é necessário o conhecimento das condições climáticas e dos parâmetros fisiológicos das culturas agrícolas, área da ciência denominada de Bioclimatologia Vegetal, e suas subdivisões em Meteorologia Agrícola, Climatologia Agrícola, Agrometeorologia e Agroclimatologia (WOLLMANN e GALVANI, 2013). Deve-se considerar também a constante mudança nas plantas cultivadas, principalmente em função da aplicação de técnicas de melhoramento genético e biotecnologia. Favarin & Oliveira (2013) mostram as profundas mudanças ocorridas nas plantas do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) desde sua origem até as cultivares atuais, definidas por meio da exploração da variabilidade genética, introdução de novos cultivares, mutações naturais e recombinações genéticas oriundas dos cruzamentos. Desse modo, a cultura passou a ser explorada em condições de plantios homogêneos, a pleno sol e em áreas cujas condições climáticas diferem de sua dispersão original.

O zoneamento agroclimático das culturas agrícolas potenciais para a produção de energia em Minas Gerais é resultante da interação entre as variáveis climatológicas e os parâmetros das culturas. No caso das culturas perenes (eucalipto, pinus, pinhão manso e café) as zonas de aptidão foram delimitadas em função dos parâmetros das culturas e das normais climatológicas das variáveis de maior restrição ao cultivo e condições de altitude. No caso das culturas de ciclo curto (cana de açúcar, milho, soja, mandioca, mamona e soja) a aptidão de cultivo foi definida em função da probabilidade de ocorrência suprimento hídrico ao longo do ciclo e dos riscos relacionados à temperatura e a umidade do ar.

Foto: Matheus Oliveira Alves/Thiago Luiz da Silva Quinaia

Resultados

Café Arábica
Coffea arabica L.

O zoneamento em questão baseou-se em parâmetros médios da cultura, solos de textura média e capacidade de água disponível no solo de 150 m. As variáveis classificatórias foram:

Condições Hídricas:
Apto: balanço hídrico com excedente de água por período superior a 140 dias/ano e déficit hídrico anual entre 40 e 220 mm.
Restrição hídrica moderada: balanço hídrico com excedente de água entre 130 e 140 dias/ano.
Restrição hídrica severa: balanço hídrico com excedente de água inferior a 130 dias/ano, ocasionando longa duração do período de estiagem e redução da oferta hídrica em fases críticas de demanda hídrica.
Restrição hídrica por excesso de água no solo: balanço hídrico com excedente de água superior a 700 mm e balanço hídrico com excedente de água no solo por período superior a 200 dias, o que poderá induzir à deficiência ou falta de oxigênio no solo (anoxia).

Condições Térmicas:
Apto: temperaturas médias anuais entre 16 e 22 ºC.
Restrições térmicas por frio: temperatura média anual menor que 16 ºC e temperatura mínima anual menor que 11 ºC.
Restrições térmicas por excesso de calor: temperatura média anual > 22 ºC e temperatura média anual do mês de novembro maior que 24ºC (ASSAD et al. 2004). Altas temperaturas impactam negativamente a floração e desenvolvimento dos grãos sendo ainda a principal causa de seus abortamentos (SEDIYAMA et al. 2001).
O zoneamento do cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais foi gerado a partir da classificação de pixel de acordo com as condições hídricas e térmicas requeridas pela cultura e o resultado é apresentado na Figura 26.
O zoneamento indica como aptas, sem nenhuma restrição térmica ou hídrica, as áreas tradicionais de cultivo em Minas Gerais, especialmente nas mesorregiões do Sul e Sudoeste de Minas, Campo das Vertentes e partes da Zona da Mata, Oeste de Minas, Metropolitana de Belo Horizonte e Alto Paranaíba.

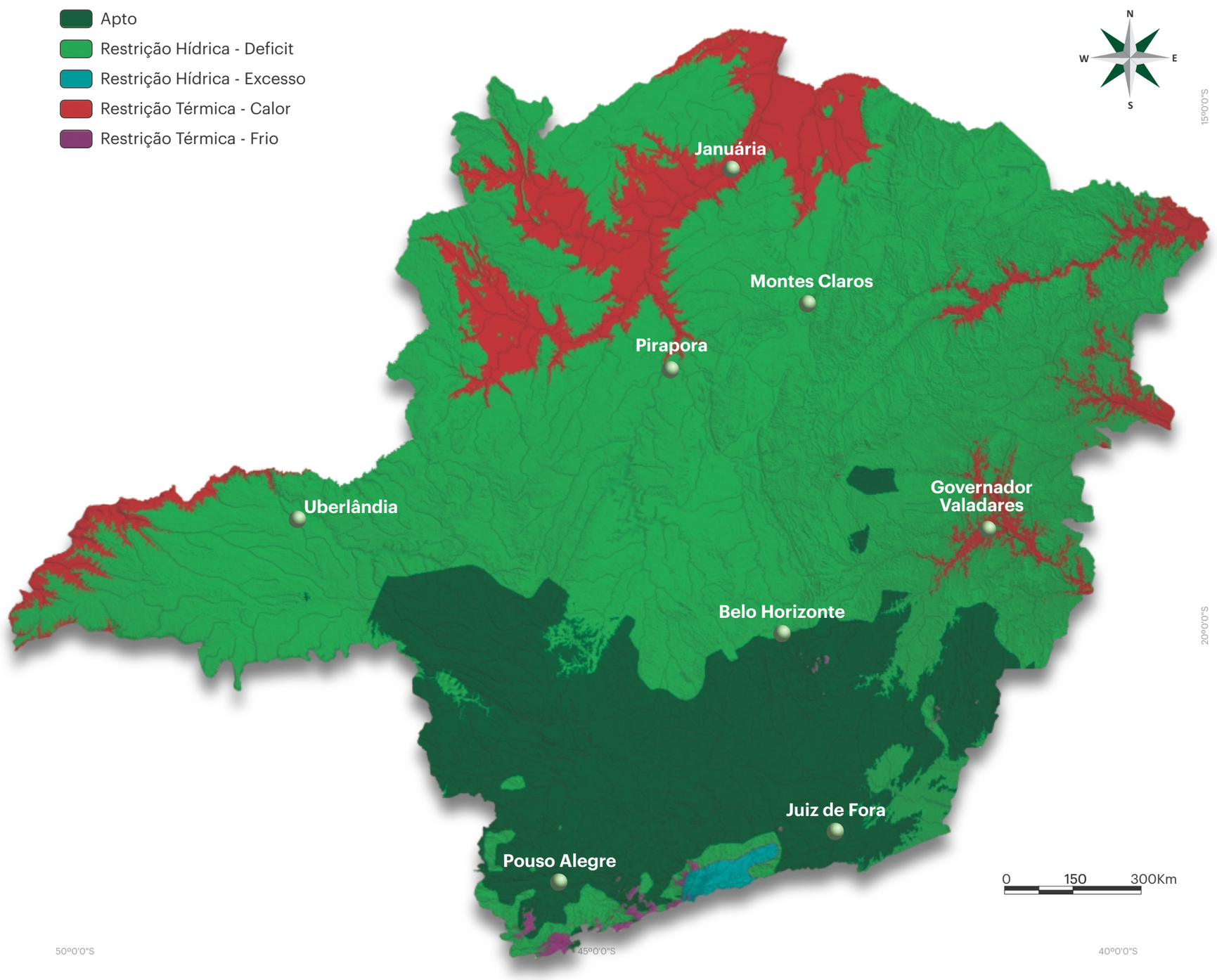


Figura 26 - Zoneamento agroclimático para o cultivo de café arábica em Minas Gerais - Fonte: Os Autores

Cana-de-Açucar
Saccharum Officinarum L.

Os parâmetros climáticos adotados para o zoneamento da cana-de-açúcar em Minas Gerais foram:

Condições Hídricas:
Déficit hídrico anual entre 150 e 300 mm.
Balanço hídrico anual com excedente hídrico superior a 600 mm.
Balanço hídrico anual com período de excedente hídrico superior a 110 dias.
Precipitação média anual superior a 1.200 mm.

Condições Térmicas:
Temperatura média anual superior a 19 ºC.

A partir do cruzamento entre as variáveis classificatórias foram estabelecidas 5 zonas relacionadas com a aptidão de cultivo e os resultados são apresentados na Figura 27.

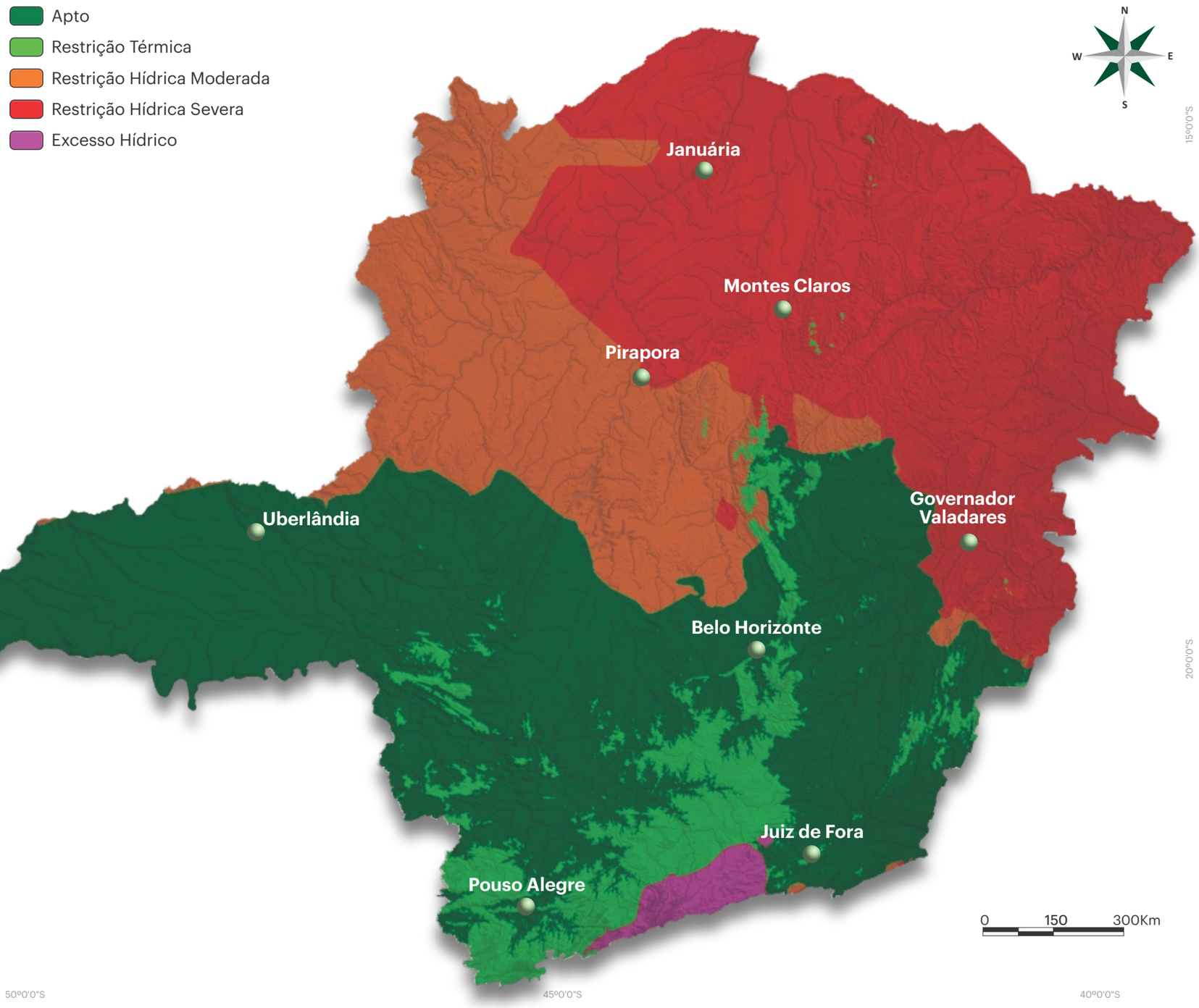


Figura 27 - Aptidão climática para o cultivo da cana-de-açúcar em Minas Gerais - Fonte: Os Autores

Eucalipto

Os parâmetros climáticos adotados para o zoneamento do eucalipto em Minas Gerais foram:

Condições Hídricas:
Precipitação Média Anual > 900 mm.
Deficiência hídrica anual inferior a 200 mm.

Condições Térmicas:
Temperatura Mínima Mês mas frio > 9 ºC.
Temperatura média anual entre 12 e 25 ºC.

A Figura 28 apresenta o zoneamento de aptidão climática e potencial produtivo para clones de eucalipto em Minas Gerais.

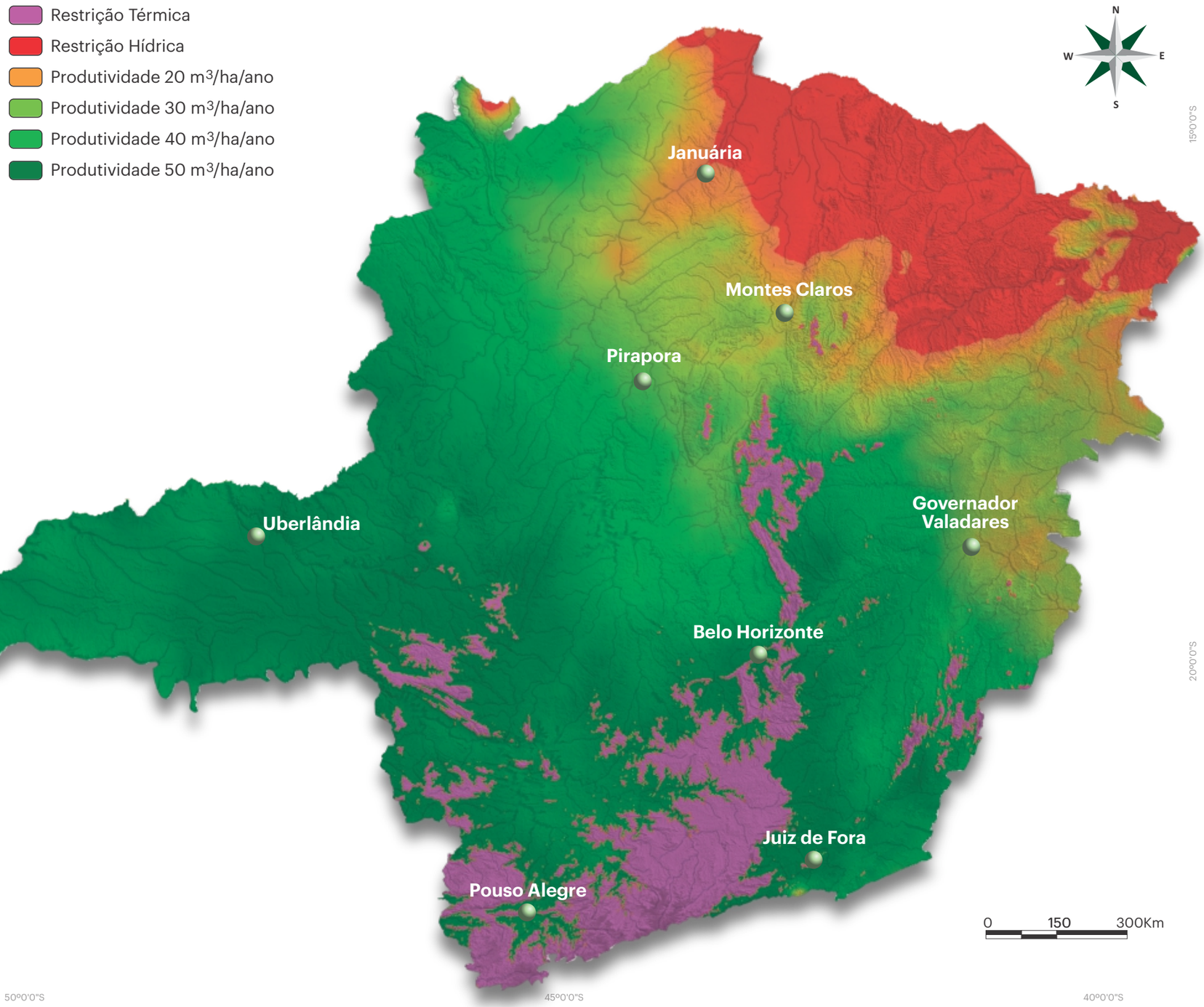


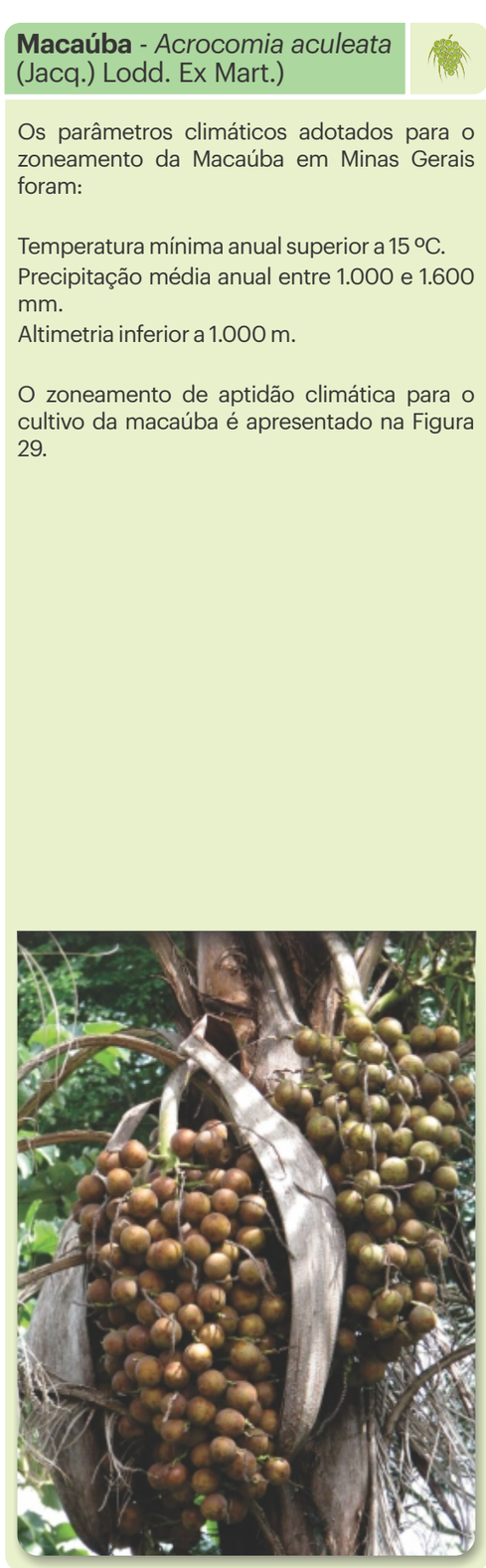
Figura 28 - Restrições climáticas e potencial produtivo de clones de eucalipto. - Fonte: Os Autores

Macaúba - *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart.

Os parâmetros climáticos adotados para o zoneamento da Macaúba em Minas Gerais foram:

Temperatura mínima anual superior a 15 ºC.
Precipitação média anual entre 1.000 e 1.600 mm.
Altimetria inferior a 1.000 m.

O zoneamento de aptidão climática para o cultivo da macaúba é apresentado na Figura 29.



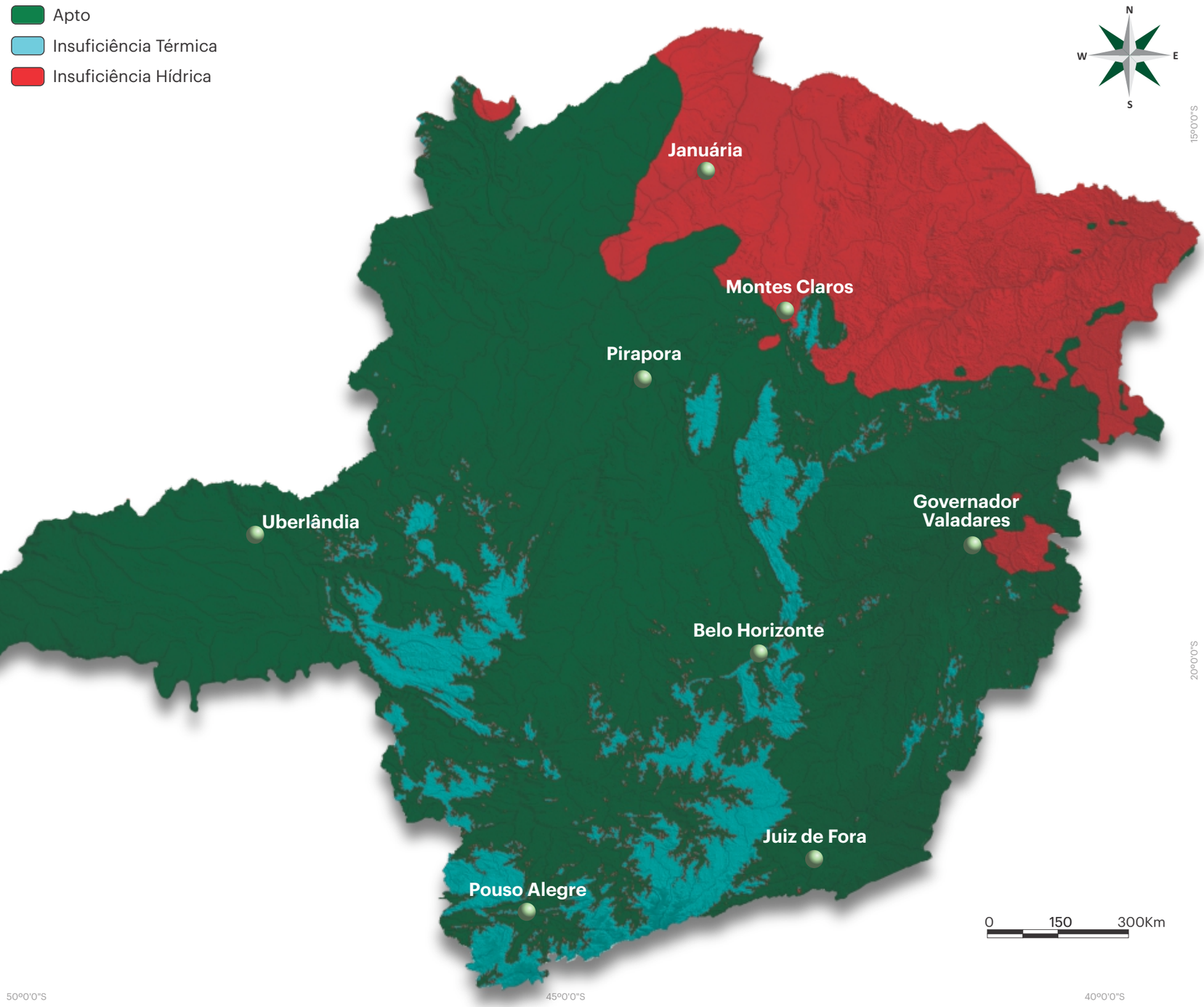


Figura 29 - Aptidão climática para o cultivo da macaúba em Minas Gerais - Fonte: Os Autores

Mamona
Ricinus communis L.

A Portaria nº 128, de 20 de julho de 2016 estabelece como parâmetros para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) da mamoneira as seguintes variáveis climatológicas:

Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) > 0,5.
Altitude entre 300 e 1500 m.
Temperatura média anual entre 20 e 30 ºC.
Precipitação maior que 700 mm no período chuvoso.
Tendo em vista que o ZARC da Mamona em 2014 limita a precipitação média anual em 500 mm e o fato da cultura apresentar bom desenvolvimento em áreas com precipitações acima de 400 mm/ano na Região Nordeste, optou-se por não inserir restrições ao cultivo em função da precipitação média anual para o estado de Minas Gerais.

As variáveis incluídas no processo de estratificação foram:
Temperatura média anual > 20 ºC.
Umidade relativa do ar (média anual) < 77%.

Os resultados do zoneamento agroclimático são apresentados na Figura 30.

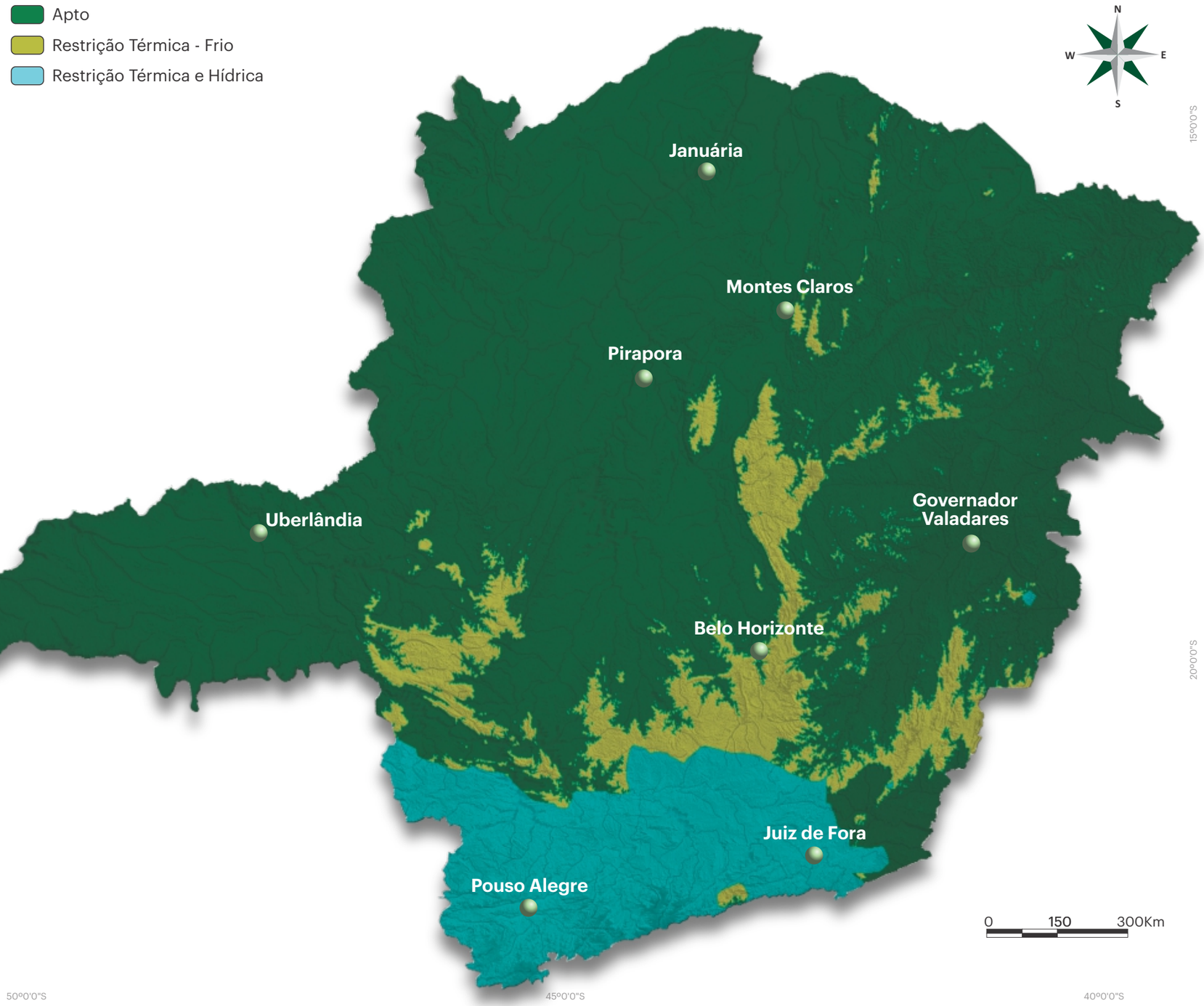
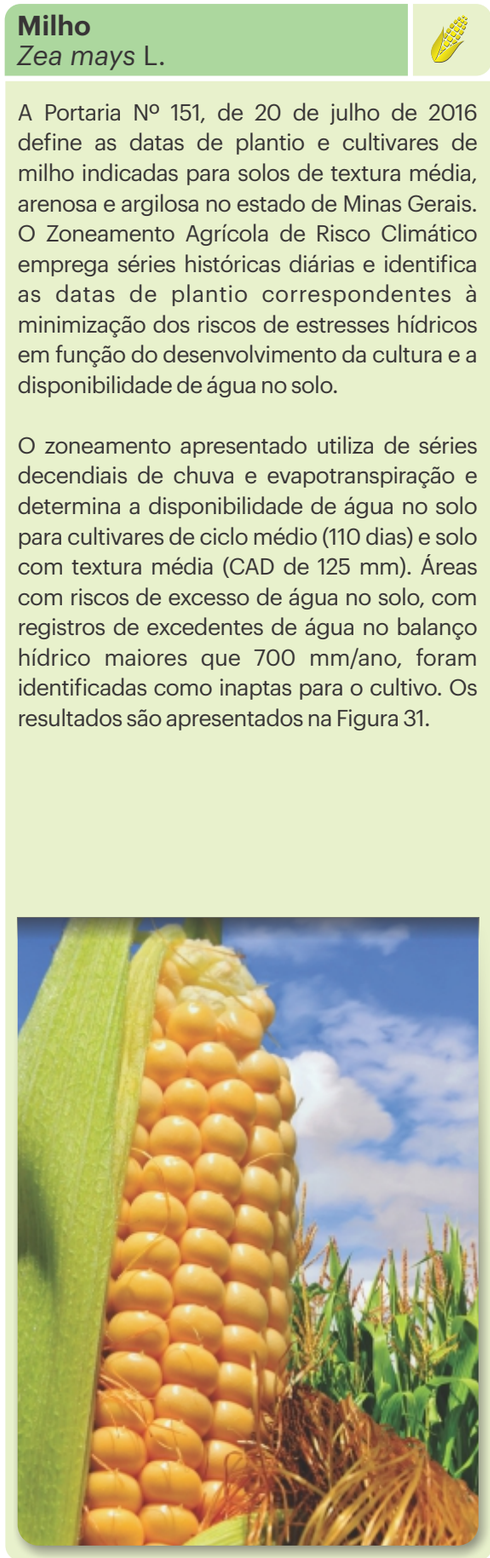


Figura 30 - Zoneamento agroclimático para o cultivo da Mamona em Minas Gerais - Fonte: Os Autores

Milho
Zea mays L.

A Portaria Nº 151, de 20 de julho de 2016 define as datas de plantio e cultivares de milho indicadas para solos de textura média, arenosa e argilosa no estado de Minas Gerais. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático emprega séries históricas diárias e identifica as datas de plantio correspondentes à minimização dos riscos de estresses hídricos em função do desenvolvimento da cultura e a disponibilidade de água no solo.

O zoneamento apresentado utiliza de séries decendiais de chuva e evapotranspiração e determina a disponibilidade de água no solo para cultivares de ciclo médio (110 dias) e solo com textura média (CAD de 125 mm). Áreas com riscos de excesso de água no solo, com registros de excedentes de água no balanço hídrico maiores que 700 mm/ano, foram identificadas como inaptas para o cultivo. Os resultados são apresentados na Figura 31.



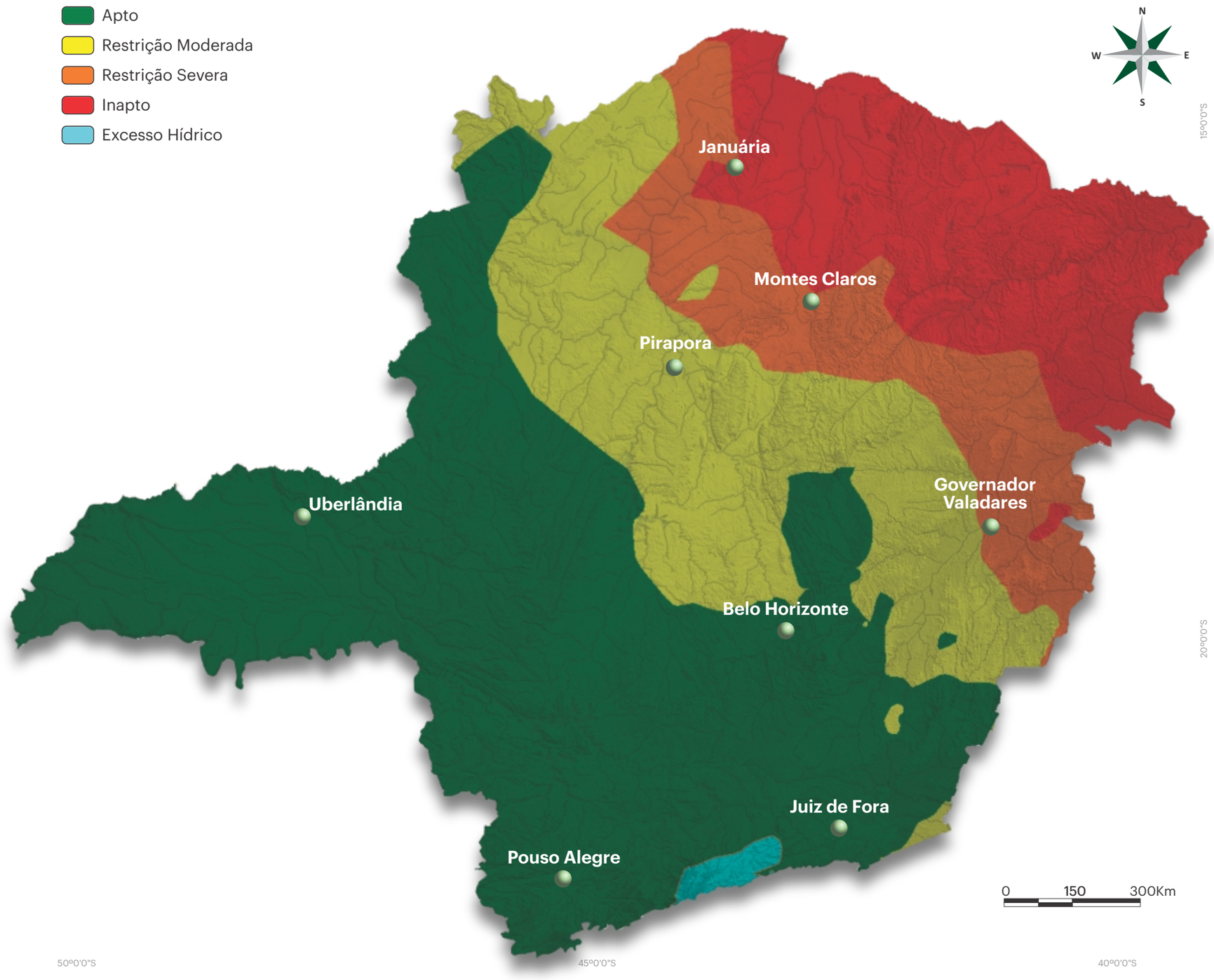


Figura 31 - Zonas de aptidão agroclimática para o cultivo do milho em Minas Gerais - Fonte: Os Autores

Pinhão-manso
Jatropha curcas L.

Pezzopane (2012) adotou limites de temperatura média anual entre 20 e 28 ºC e precipitação anual entre 1.000 e 1.500 mm para estabelecer o zoneamento agrometeorológico do pinhão-manso para o Espírito Santo. Possas et al. (2012) adotou a temperatura entre 18 e 28 ºC e precipitação acima de 1.000 mm. Vairavan et al. (2007) citados por Resende et al. (2009), definem a temperatura ótima de crescimento da espécie entre 30 e 40 ºC. Maes et al. (2009) estudaram as zonas de ocorrência natural da espécie e encontraram valores de temperatura média anual variando entre 19,3 e 27,2 ºC e precipitações acima de 944 mm, valores utilizados no zoneamento atual, apresentado na Figura 32.

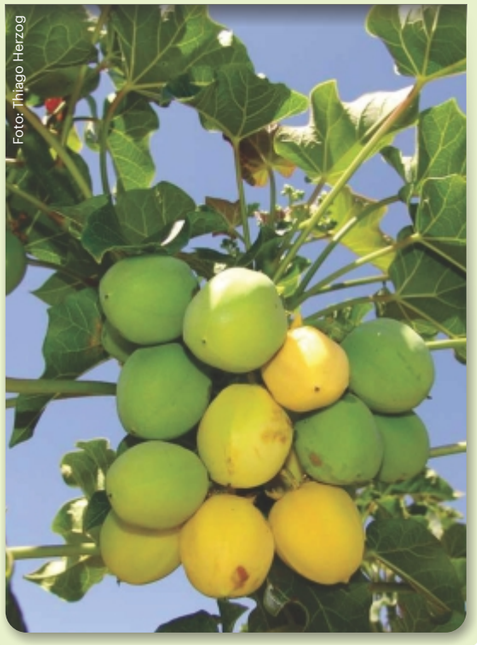


Foto: Thiago Herzog

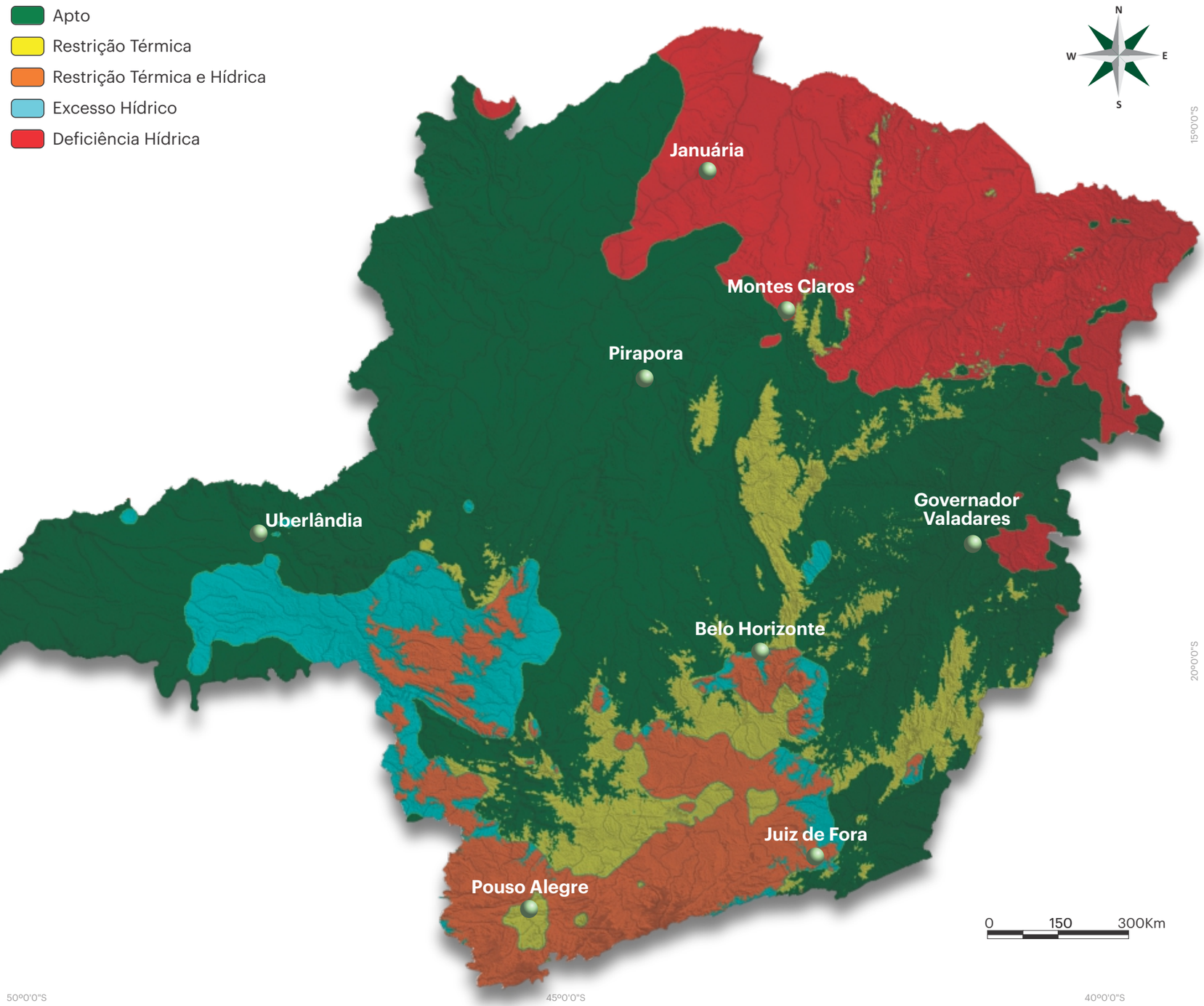


Figura 32 - Aptidão climatológica para o cultivo de Pinhão-manso em Minas Gerais - Fonte: Os Autores

Pinus

O cultivo de Pinus no Brasil teve maior desenvolvimento no estado de São Paulo e estados da região Sul, onde foram introduzidos com êxito materiais genéticos de origem subtropical proveniente da região sul dos Estados Unidos. As espécies mais plantadas foram *Pinus elliottii* var. *elliottii e Pinus taeda*. A partir dos trabalhos de introdução e zoneamento de espécies florestais no Brasil pelo PRODEPEF (PRODEPEF/FAO/PNUD/IBDF/BRA-45 - Projeto de Desenvolvimento e Pesquisa Florestal de 1976 a 1977) novas espécies foram introduzidas e as provenientes de clima tropical se adaptaram nas regiões tropicais brasileiras. As espécies tropicais de melhor adaptação foram Pinus *oocarpa*, Pinus *caribaea var. hondurensis* e Pinus *tecunumanii*.

A Figura 33 apresenta a aptidão climática para Pinus tropicais e subtropicais em Minas Gerais de acordo com as recomendações de Golfari (1975).

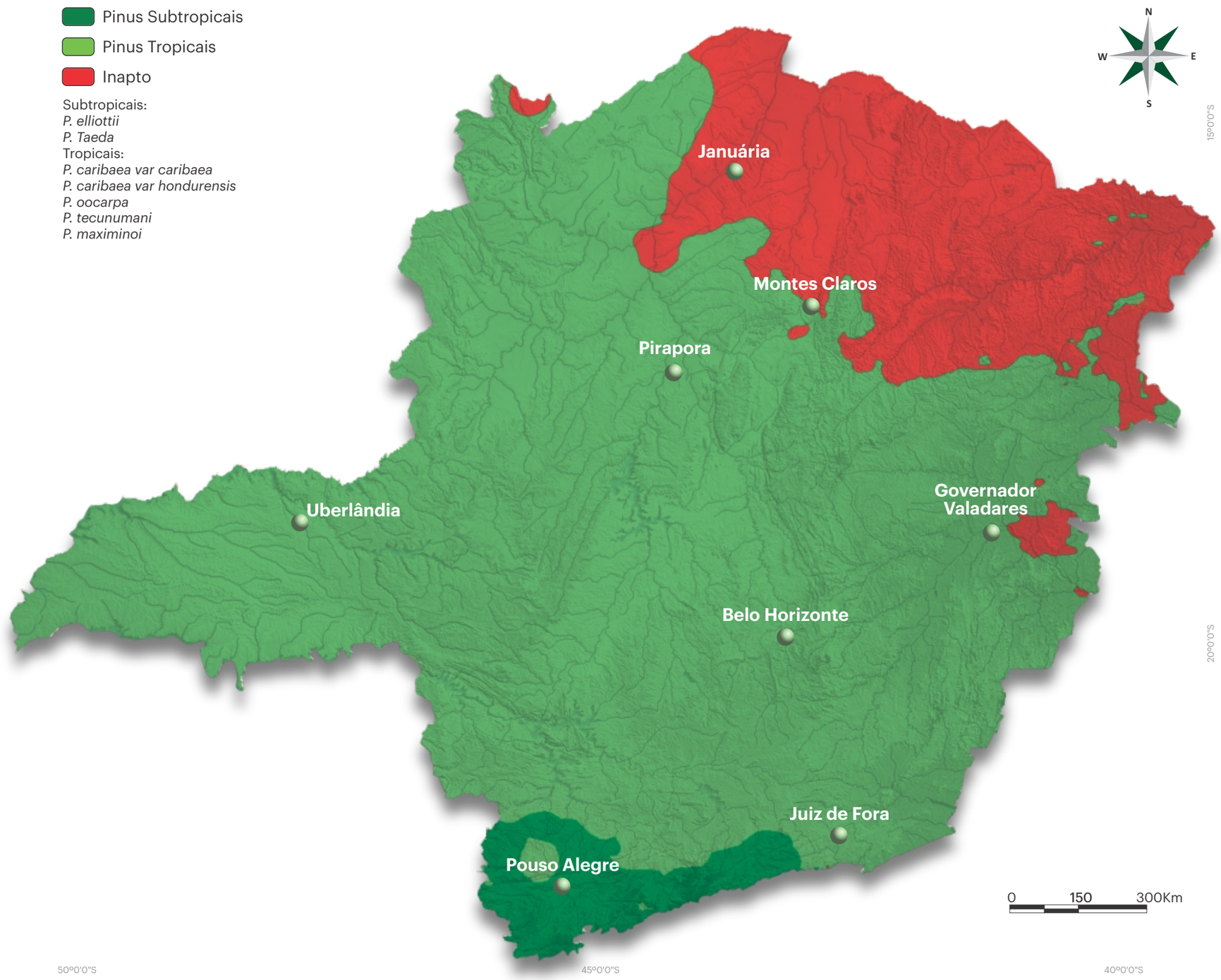


Figura 33 - Aptidão para o cultivo de Pinus spp no estado de Minas Gerais - Fonte: Os Autores

Soja
Glycine max (L.) Merrill.

O zoneamento agroclimatológico da soja para o estado de Minas Gerais seguiu os mesmos padrões adotados para a cultura do milho, diferenciando-se em função do volume de solo explorado pelas raízes, ciclo de crescimento e produção e coeficiente de cultura. Os resultados são apresentados na Figura 34.

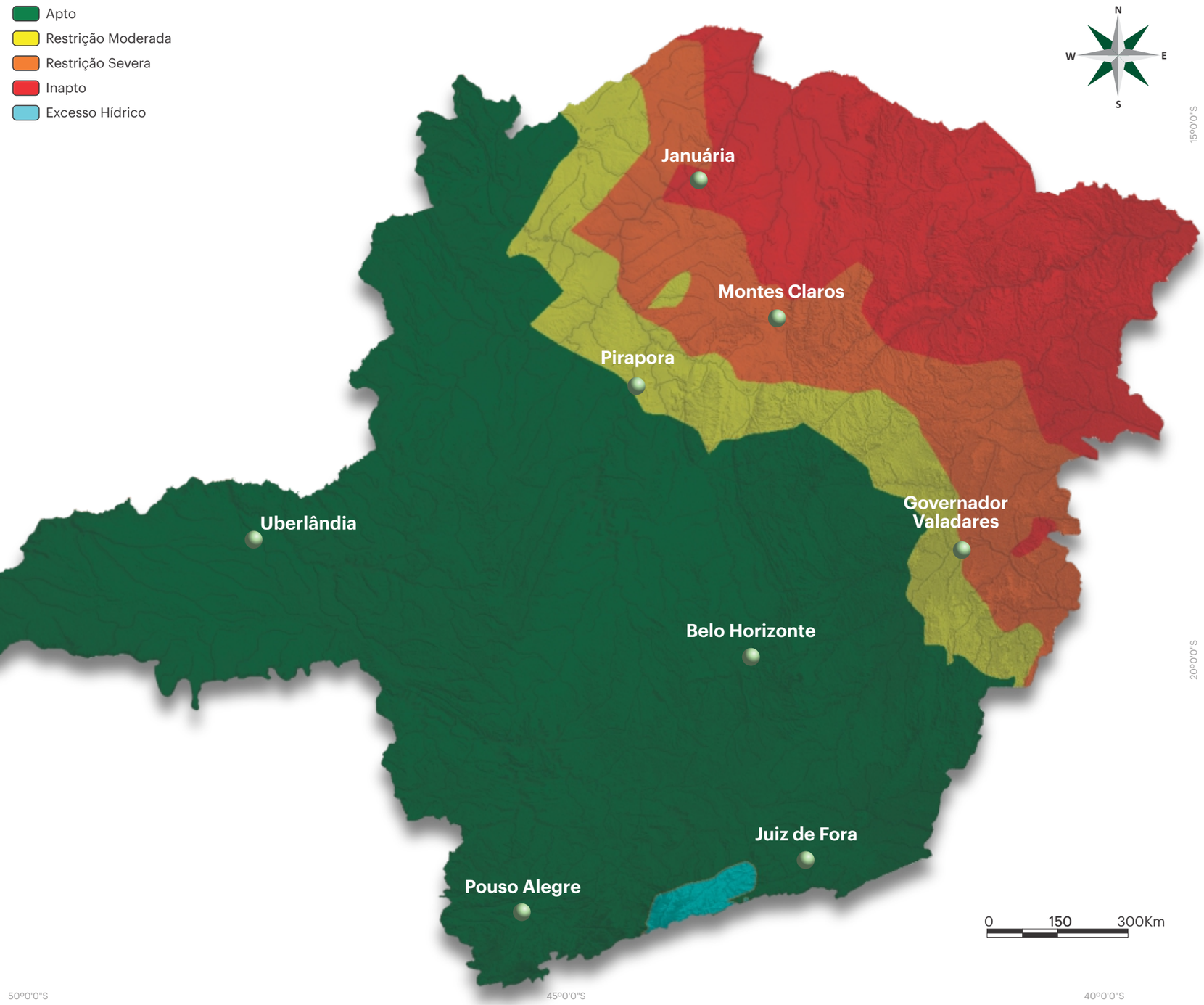


Figura 34 - Aptidão climática para o cultivo da soja no estado de Minas Gerais - Fonte: Os Autores

Capítulo 3

3 - Fontes de Biomassa

3.1 Café

3.2 Cana-de-Açúcar

3.3 Milho

3.4 Soja

3.5 Vegetais Lenhosos

3.6 Resíduos Sólidos Urbanos

3.7 Resíduos do Tratamento de Esgoto

3.8 Efluentes Líquidos Animais

3.9 Outras Fontes

3.1 - Café

O cafeeiro é um arbusto da família *Rubiaceae* e do gênero *Coffea*, da qual se conhecem 103 espécies (Figura 35).

Desde 1840, o Brasil é um dos maiores líderes do mercado cafeeiro mundial (ORSINI, 2012). Importantes centros urbanos no interior dos estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Espírito Santo, Bahia e Rondônia surgiram graças à ocupação do café nas suas montanhas e vales (ABIC, 2017). No ano de 2016, 6,44% das exportações do agronegócio brasileiro foi representado pelo café, ocupando a 5ª posição no ranking, com receita de US$ 5,47 bilhões. Os principais destinos foram Alemanha, Estados Unidos, Itália, Japão e Bélgica (CONAB, 2017).

Figura 35 – Grão e plantação de café
Fonte: http://ruralpecuaria.com.br/painel/img/noticias/2924/noticias_1434570487.jpg

Diante do cenário de grande oferta do café no mercado nacional e internacional, a cadeia produtiva desse grão no Brasil faz com que o setor se profissionalize, produza e comercialize, cada vez mais com eficácia e qualidade. As vantagens do país para a produção de café incluem tanto as condições climáticas e propriedades dos solos, quanto as tecnologias já desenvolvidas (ABIC, 2017).

O café é rico em óleos, sendo que o tipo arábica contém 12 a 18% e o conilon de 9 a 14%. Estes óleos são constituídos por ácido palmítico (34,5%) e linoleico (40,3%). Os ácidos graxos do café são semelhantes aos dos óleos vegetais. (TURATTI, 2001; VIDAL, 2001). Uma colheita de café com 36,9 e 38,8 milhões de sacas de 60 quilos geram 314 mil toneladas de biodiesel a partir da borra do café, com isso pode se suprir mais de 20% da produção. (ANP, 2009; EBC 2009).

O óleo de café é extraído por solvente ou prensagem, e na sua composição química são encontrados os esteróis, que possuem propriedades cosméticas de retenção de umidade, penetração na pele, aderência, entre outras, que são utilizados em cremes cosméticos. Por outro lado, o café pode ser empregado na fabricação de produtos alimentícios tais como: em recheios de balas, realçados do sabor de café no café solúvel, na preparação do café gelado, café entalado, cappuccinos, pudins, produtos que utilizam leite, produtos de confeitaria, sobremesas e sorvetes (TURATTI, 2001).

O café contém outro tipo de subproduto, a sua casca. Ela normalmente é jogada no lixo, ou utilizada para a forração dos terrenos dos cafezais, ou para a restituição dos fertilizantes retirados pela planta. Porém, a casca tem um grande potencial energético, que pode ser substituído pela lenha, ou pode ser utilizado em empresas que utilizam madeira na geração de energia, pois a casca de café é mais econômica e ecológica. (ABIC, 2011).

De acordo com Vale (2011), a casca de café, assim como outras biomassas, pode gerar eletricidade em termoelétricas, a partir de combustão em fornalhas, gerando energia na forma de calor e vapor, que por sua vez é utilizado para a produção de energia elétrica.

Cultivo

As espécies de café mais cultivadas e economicamente mais importantes incluem o *Coffea arabica*, conhecido como café arábica, *Coffea canephora* e *Coffea conillon*, também chamado de café robusta. Normalmente, a colheita do café acompanha um calendário definido que começa em março e termina em outubro, sendo os meses de maio a agosto, o período com cerca de 90 % de colheita (CONAB, 2017).

O café arábica é mundialmente o mais produzido e o que contém menor teor de cafeína. Eles são adaptados à regiões de temperaturas agradáveis e altitude elevada, seu plantio é formado por mudas oriundas de sementes, seus galhos são pequenos e cheios, os seus grãos claros e o seu pó mais fino. Devido a uma complexidade de aromas e sabores, essa espécie se destaca dentre as demais do gênero Coffea, se tornando a mais cultivada para o preparo da bebida (ORSINI, 2012), além de apresentar os maiores preços no mercado.

O café conilon é adaptado em regiões de baixas altitudes e altas temperaturas, com grande rusticidade, vigor e resistência a deficiência hídricas. A sua multiplicação pode ser feita por mudas formadas de sementes ou de estacas. Os grãos são amarelados e galhos longos, e são mais resistentes a pragas e doenças. Além disso, as suas produtividades são mais elevadas do que o arábica (CONAB, 2017). Porém, a sua qualidade é inferior. A sua ampla aceitação do mercado se deve ao preço que é baixo, tornando-o atrativo nas indústrias de café solúvel.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2014, o total de áreas destinadas ao cultivo de café no Brasil foi de 2.002.151 hectares, sendo que a maior parte sua plantação se encontra no sudeste do país (84%). O estado de Minas Gerais obtém cerca de 51% da área plantada no Brasil, conforme apresentado na Tabela 2.

Estado	Área de Cultivo	Estado	Área de Cultivo
Rondônia	86189	Espírito Santo	446090
Acre	1373	Rio de Janeiro	12775
Amazonas	371	São Paulo	204960
Pará	4377	Paraná	38333
Ceará	6136	Mato G. do Sul	1108
Pernambuco	2885	Mato Grosso	20110
Bahia	161936	Goiás	5599
Minas Gerais	1009340		

Tabela 2 - Área total de cultivo de café em hectares, por estado, no Brasil - Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal, 2014, adaptado.

Em Minas Gerais, de acordo com IBGE (2014), os municípios que tem contribuição no cultivo do café, estão distribuídos principalmente na região do Sul/Sudoeste de Minas, com 42% da área plantada do estado.

O Brasil é o maior produtor de café no mundo, sendo responsável por 30% de todo o café comercializado no mercado internacional. O segundo maior país exportador é o Vietnã, que responde por 19% das exportações mundiais seguido pela Colômbia com 9,5%. (ABIC, 2017). A produção mundial de café no período de outubro de 2015 a setembro de 2016 foi de 147,994 milhões de sacas de 60 kg, cabendo destaque ao Vietnã e Indonésia, que para o período, foram responsáveis por 25% da produção (SANTOS e FERREIRA, 2016). As Tabelas 3 e 4 apresentam a produção mundial, bem como os principais países produtores e a exportação mundial de café, utilizando como unidade volume em mil sacas de 60 kg.

Fontes de Biomassa

Países	2015		2014		2013		2012		2011	
	Exportação	Part. (%)	Exportação	Part. (%)	Exportação	Part. (%)	Exportação	Part. (%)	Exportação	Part. (%)
*Brasil	43.200	30,13	45.346	31,97	49.152	33,49	50.826	34,44	43.484	31,84
Vietnã	27.500	19,18	27.500	19,39	27.500	18,74	25.000	16,94	26.500	19,40
Colômbia	13.500	9,41	12.500	8,81	12.124	8,26	9.927	6,73	7.652	5,60
Indonésia	11.000	7,67	9.000	6,34	11.667	7,95	13.048	8,84	7.288	5,34
Etiópia	6.400	4,46	6.625	4,67	6.527	4,45	6.233	4,22	6.798	4,98
Índia	5.800	4,04	5.517	3,89	5.075	3,46	4.977	3,37	4.921	3,60
Honduras	5.800	4,04	5.400	3,81	4.568	3,11	4.537	3,07	5.903	4,32
México	3.900	2,72	3.900	2,75	3.916	2,67	4.327	2,93	4.563	3,34
Uganda	4.800	3,35	3.800	2,68	3.602	2,45	3.878	2,63	3.075	2,25
Guatemala	3.400	2,37	3.500	2,47	3.159	2,15	3.743	2,54	3.840	2,81
Peru	2.200	2,23	3.400	2,40	3.338	2,96	4.453	3,02	5.373	3,93
Costa do Marfim	1.800	1,26	2.175	1,53	1.923	1,31	2.046	1,39	1.886	1,38
Nicarágua	2.000	1,39	2.000	1,41	2.017	1,37	1.890	1,28	2.193	1,61
Costa Rica	1.508	1,05	1.508	1,06	1.444	0,98	1.571	1,06	1.462	1,07
El Salvador	680	0,47	680	0,48	537	0,37	1.235	0,84	1.152	0,84
Subtotal	**134.488**		**132.851**		**137.549**		**137.691**		**126.090**	
Outros Países	8.912	6.21	8.999	6,34	9.196	6,27	9.871	6,69	10.493	7,68
Total	**143.400**	**100,00**	**141.850**	**100,00**	**146.745**	**100,00**	**147.562**	**100,00**	**136.583**	**100,00**

Tabela 3 - Produção mundial e principais países produtores. Fonte: (*) MDIC e SECEX, OIC.

Exportação Mundial de Café - Principais Países Produtores (volume em mil sacas de 60kg)										
Países	2015		2014		2013		2012		2011	
	Exportação	Part. (%)	Exportação	Part. (%)	Exportação	Part. (%)	Exportação	Part. (%)	Exportação	Part. (%)
*Brasil	37.100	33,48	36.735	32,88	32.010	28,82	28.735	25,39	33.610	32,14
Vietnã	20.200	18,23	25.000	22,38	20.475	18,43	25.475	22,51	17.675	16,90
Colômbia	12.300	11,10	10.954	9,80	9.670	8,71	7.170	6,34	7.734	7,40
Índia	5.100	4,60	5.131	4,59	4.963	4,47	5.288	4,67	5.840	5,58
Indonésia	6.600	5.96	4.548	4,07	10.882	9,80	10.940	9,67	6.185	5,91
Honduras	5.000	4,51	4.261	3,81	4.185	3,77	5.508	4,87	3.947	3,77
Uganda	3.500	3,16	3.442	3,08	3.672	3,31	2.685	2,37	3.142	3,00
Etiópia	2.900	2,62	3.137	2,81	2.870	2,58	3.203	2,83	2.675	2,56
Guatemala	2.900	2,62	3.045	2,73	2.575	2,32	3.750	3,31	3.697	3,54
Peru	2.400	2,17	2.891	2,59	3.971	3,57	4.310	3,81	4.697	4,49
México	2.500	2,26	2.448	2,19	3.132	2,82	3.556	3,14	3.907	2,78
Nicarágua	1.900	1,71	1.900	1,70	1.661	1,50	1.987	1,76	1.468	1,40
Costa do Marfim	1.400	1,26	1.567	1,40	1.942	1,75	1.712	1,51	772	0,74
Costa Rica	1.100	0,99	1.212	1,08	1.344	1,21	1.374	1,21	1.243	1,19
El Salvador	430	0,39	430	0,38	1.103	0,99	1.044	0,92	1.826	1,75
Subtotal	**105.330**		**106.701**		**104.455**		**106.737**		**97.418**	
Outros Países	5.470	4,94	5.027	4,50	6.626	5,97	6.420	5,67	7.155	6,84
Total	**110.800**	**100,00**	**111.728**	**100,00**	**111.081**	**100,00**	**113.157**	**100,00**	**114.573**	**100,00**

Tabela 4 - Exportação Mundial e Principais países produtores. Fonte: (*) MDIC e SECEX, OIC.

No ano de 2015, a produção de café teve um leve crescimento. Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Café (ABIC), o café apresentou uma recuperação de mais de 1,24% em 2014, atingindo 43,2 milhões de sacas. Esta recuperação foi obtida após um aumento de 0,86% nos doze meses entre novembro de 2014 e outubro de 2015, com o complemento de 20,508 milhões de sacos. O seu consumo per capita também obteve um aumento. Para o café torrado esse aumento foi de 4,90 kg/habitante e para o moído de 6,12 kg de café verde em grão, o que equivale a 81 litros/habitante/ano (ABIC, 2015).

A evolução de consumo interno de café no Brasil, no período compreendido entre 2000 até o mês de outubro de 2015, em milhões de sacas de 60 kg de café esta apresentada na Figura 36.

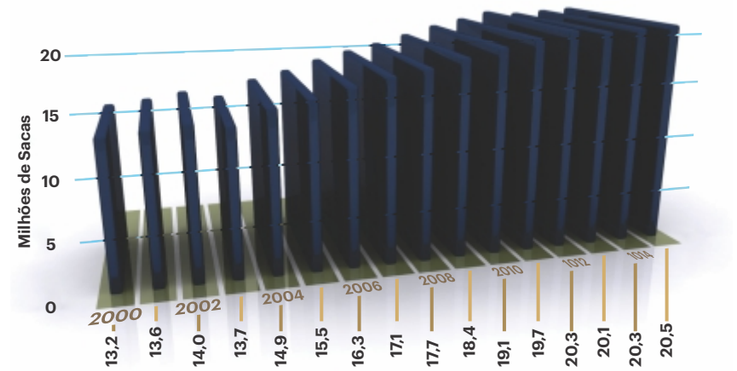


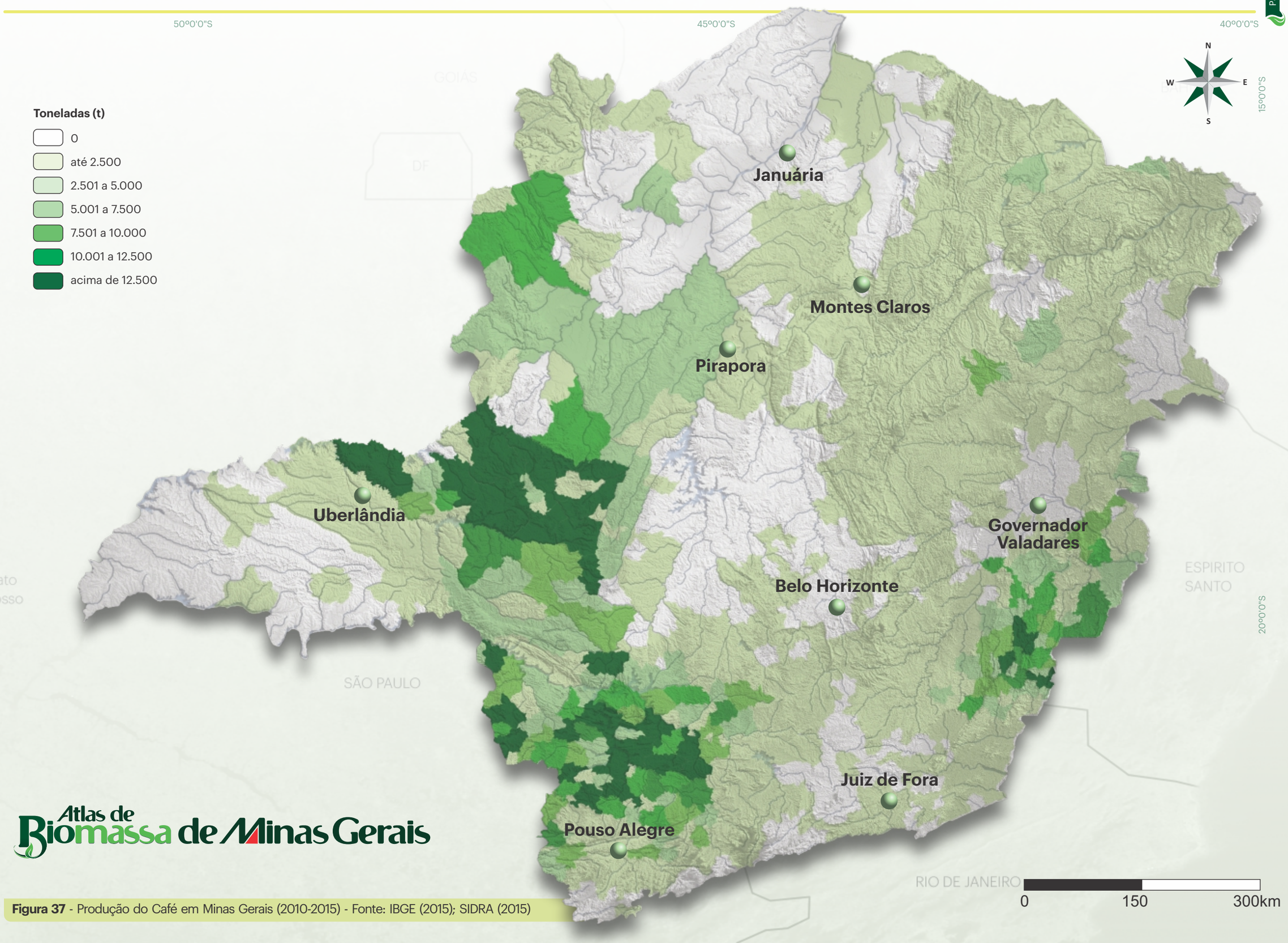
Figura 36 - Evolução do consumo interno de café no Brasil.
Fonte: ABIC, 2015.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2014, foram produzidas 2.645.494 toneladas de café no Brasil, sendo que a maior parte de sua produção encontra-se no sudeste do país (85%). O estado de Minas Gerais obtém cerca de 51% de sua produção do Brasil. A Tabela 5 apresenta a produção total de café por estado.

Estado	Quant. Produzida	Estado	Quant. Produzida
Rondônia	84.734	Espírito Santo	618.262
Acre	2.229	Rio de Janeiro	17.097
Amazonas	2.011	São Paulo	254.376
Pará	993	Paraná	80.304
Ceará	1.713	M. Grosso do Sul	1.333
Pernambuco	893	Mato Grosso	7.175
Bahia	209.108	Goiás	18.123
Minas Gerais	1.345.834	Distrito Federal	1.309

Tabela 5 - Produção total de café em toneladas, por estado, no Brasil.
Fonte: IBGE – Produção Agrícola Municipal, 2014, adaptado.

Minas Gerais é o estado de maior produção de café, de acordo com IBGE (2015). A produção está distribuída principalmente na região do Sul/Sudoeste do estado. A Figura 37 permite observar a produção total de café entre os anos de 2010-2015.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 37 - Produção do Café em Minas Gerais (2010-2015) - Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)

3.2 - Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum L.*, da família *Poaceae*, surgiu na ilha de Nova Guiné, no meio do oceano pacífico e se espalhou para o mundo gradualmente, junto com a migração humana (NOVA CANA, 2017). Cultura semi-perene (após o plantio, pode ser cortada várias vezes antes de ser replantada), possui ciclo produtivo de seis anos, em média, com cinco cortes (NOVACANA, 2013). Cultivada em locais de clima tropical ou sub-tropical, sendo que a altura da espécie está diretamente ligada à quantidade de sol que ela recebe.

Por muito tempo o Brasil teve a hegemonia da produção de cana-de-açúcar. A descoberta do ouro (final do século XVII) em Minas Gerais, retirou o primeiro lugar na geração de riquezas (UDOP, 2017). Por muito tempo, o açúcar representou valores de produção maiores que todos os outros produtos agrícolas (UDOP, 2017). O aumento da concorrência se deu a partir do século XVIII com o crescimento da produção nas ilhas do Caribe e Antilhas, cabendo ao Haiti (então colônia francesa) o título de maior produtor mundial (UDOP, 2017). O incentivo de Napoleão à produção do açúcar a partir da beterraba, reduziu a dependência das colônias e de outros lugares de além-mar.

Da cana-de-açúcar se faz dois produtos essenciais para a economia mundial: o açúcar, indispensável na alimentação humana, e o álcool, como combustível para veículos (etanol). Hoje, da planta da cana, pode-se aproveitar quase tudo: o bagaço pode gerar energia elétrica, biogás e papel e das cinzas do bagaço, adubo potássico-fosfatado (CRISPIM & VIEIRA, 2009). A vinhaça – resíduo pastoso, resultado da destilação da garapa fermentada para a obtenção de etanol – pode ser utilizada na fertirrigação, visando uma maior produtividade e redução no uso de fertilizantes químicos (NOVA CANA, 2013), além da produção de biogás.

Outra tecnologia de reaproveitamento da biomassa da cana é a produção do etanol de segunda geração, que consiste basicamente na conversão da porção lignocelulósica, presentes no bagaço e na palhiça, em açúcares fermentáveis para a produção de etanol. Contudo, esta promissora tecnologia, ainda necessita de mais desenvolvimento para competir com as demais (BRASSOLATTI et al. 2016)

Cultivo

O parque produtor de cana-de-açúcar no Brasil conta com aproximadamente 400 usinas de processamento, alimentadas por 70 mil produtores da matéria-prima (AGRIC, 2017). Esta produção se concentra principalmente no Sudeste do país, sendo o estado de São Paulo responsável por cerca de 60% da produção nacional em 2015 (IBGE, 2015). A região Centro-Oeste tem se tornado polo de expansão, principalmente devido aos menores preços de terras. A área plantada de cana é de aproximadamente 10 milhões de hectares e representa aproximadamente 14% do total de terras cultiváveis no Brasil em 2015 (IBGE, 2015). O cultivo da cana-de-açúcar, geralmente tem se expandido em áreas de pastos, não inibindo a produção de alimentos nem provocando aumento considerável nas taxas de desmatamento, assim como afirmam alguns órgãos internacionais (AGRIC, 2017).

A Tabela 6 apresenta os estados com as maiores áreas plantadas de cana-de-açúcar em 2015.

Estado	Área Plantada (ha)	Estado	Área Plantada (ha)
São Paulo	5.576.838	Bahia	104.863
Minas Gerais	917.878	Rio de Janeiro	79.388
Goiás	911.847	Espírito Santo	76.683
Paraná	626.375	Rio Grande do Norte	59.491
Mato Grosso do Sul	546.099	Sergipe	57.258
Pernanbuco	315.467	Maranhão	47.685
Alagoas	308.006	Tocantins	36.395
Mato Grosso	291.100	Rio Grande do Sul	19.508
Paraíba	120.559	Pará	13.301

Tabela 6 – Áreas de cultivo da cana-de-açúcar no Brasil.
Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal (Sidra, 2015), adaptado.

Os oito estados com maior área plantada são responsáveis por 94,5% da produção nacional (CONAB, 2015). De acordo com informações do IBGE, em 2015, o Brasil possuía ao todo 10.161.622 hectares de área plantada com cana-de-açúcar. A região sul tinha 653.913 hectares, a região sudeste 6.650.787 hectares, a região centro-oeste 1.749.502 hectares, a região nordeste 1.047.500 hectares e a região norte possuía 59.920 hectares de área plantada (IBGE, 2015). Portanto, a região sudeste era responsável por 66% de área plantada de cana-de-açúcar (Figura 38).

Figura 38 - Cultivo de cana-de-açúcar nas regiões brasileiras. - Fonte: IBGE (2015).

Produção

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de cana-de-açúcar, embora, nos últimos anos, a falta de investimento no setor, associada às condições climáticas adversas, resultou em produções abaixo da média (OCDE-FAO, 2015).

Do total da produção da região Sudeste, o estado de Minas Gerais contribuiu com aproximadamente 9% (CONAB, 2015). Dos 853 municípios mineiros, apenas 19% não são produtores. Uberaba e Frutal se destacaram na produção da cana-de-açúcar em 2015, com mais de 5 milhões de toneladas produzidas. De acordo com dados do IBGE (SIDRA, 2015), o Triângulo Mineiro é o maior produtor do estado. A Tabela 7 apresenta os 10 municípios que mais produzem cana em Minas Gerais.

Município	Quant. Produzida (t)	Município	Quant. Produzida (t)
Uberaba	6.266.200	Iturama	2.161.500
Frutal	5.001.040	João Pinheiro	2.158.950
Santa Vitória	3.477.500	Limeira do Oeste	1.936.960
Conceição das Alagoas	3.072.000	Paracatu	1.589.000
Campo Florido	2.595.286	Conquista	1.474.200

Tabela 7 - Municípios maiores produtores de cana-de-açúcar em Minas Gerais.
Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal (Sidra, 2015).

A Figura 39 apresenta a produção média de cana de açúcar em Minas Gerais, para os anos de 2010 a 2015, nos municípios em que a Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais (SIAMIG) tem atuação.

O estado sofreu o impacto das mudanças no clima, o que prejudicou negativamente a produtividade, mas no final de 2015 foi estimado um incremento de 4,9% na produção em relação à última safra (2014), em razão do aumento de 0,7% na área plantada e de 4,1% na produtividade (CONAB, 2015). A produção de etanol total (anidro e hidratado) teve um acréscimo de 5%, passando de 2.740.844,5 para 2.878.566 litros e a produção de açúcar foi de 3.097 toneladas (CONAB, 2015).

Bagaço e palhiço da cana-de-açúcar

Na primeira metade da década de 80, a elevação do uso industrial de biomassa se deu devido à substituição do óleo combustível por carvão vegetal; a produção de álcool utilizando o bagaço de cana-de-açúcar e à expansão da siderurgia a carvão vegetal (INNOCENTE, 2011). A queima da biomassa para produção de energia térmica ou elétrica

é uma das formas de sua utilização, assim como a gaseificação e fermentação também têm sido processos utilizados no processamento da biomassa para produção de combustíveis (GENOVESE et al., 2006).

O bagaço (subproduto do processo de moagem) e o palhiço (material remanescente da colheita da cana, sem queimar) apresentam basicamente a mesma composição química elementar: carbono (~45%), hidrogênio (~6%), nitrogênio (0,5 – 1%), oxigênio (~43%) e enxofre (~0,1%) (INNOCENTE, 2011). Salienta-se que um alto poder calorífico está relacionado com a elevada proporção de carbono e hidrogênio, assim como a maior fração de oxigênio tende a reduzi-lo.

De acordo com Vian (2017), o poder calorífico do palhiço equivale ao da madeira e é superior ao do bagaço da cana. Por cada tonelada de cana processada, produz-se aproximadamente 280 kg de bagaço (ALCARDE, 2017). Um hectare de cana-de-açúcar produz de quatro a nove toneladas de palhiço (VIAN, 2017). A composição do bagaço depende da variedade, do método de colheita e da eficiência das moendas da fábrica (INNOCENTE, 2011). É constituído de fibra, celulose, água, açúcares e impurezas, e apresenta uma umidade em torno de 40 – 50%. O poder calorífico do bagaço depende do seu grau de umidade e do teor de açúcar residual (SCHMIDT, 2008). O bagaço da cana-de-açúcar apresenta poder calorífico inferior (bagaço úmido) de 7,53 MJ.kg-¹ e poder calorífico superior (bagaço após secagem) de [10],[56] MJ.kg-¹ (PAOLIELLO, [2006]).

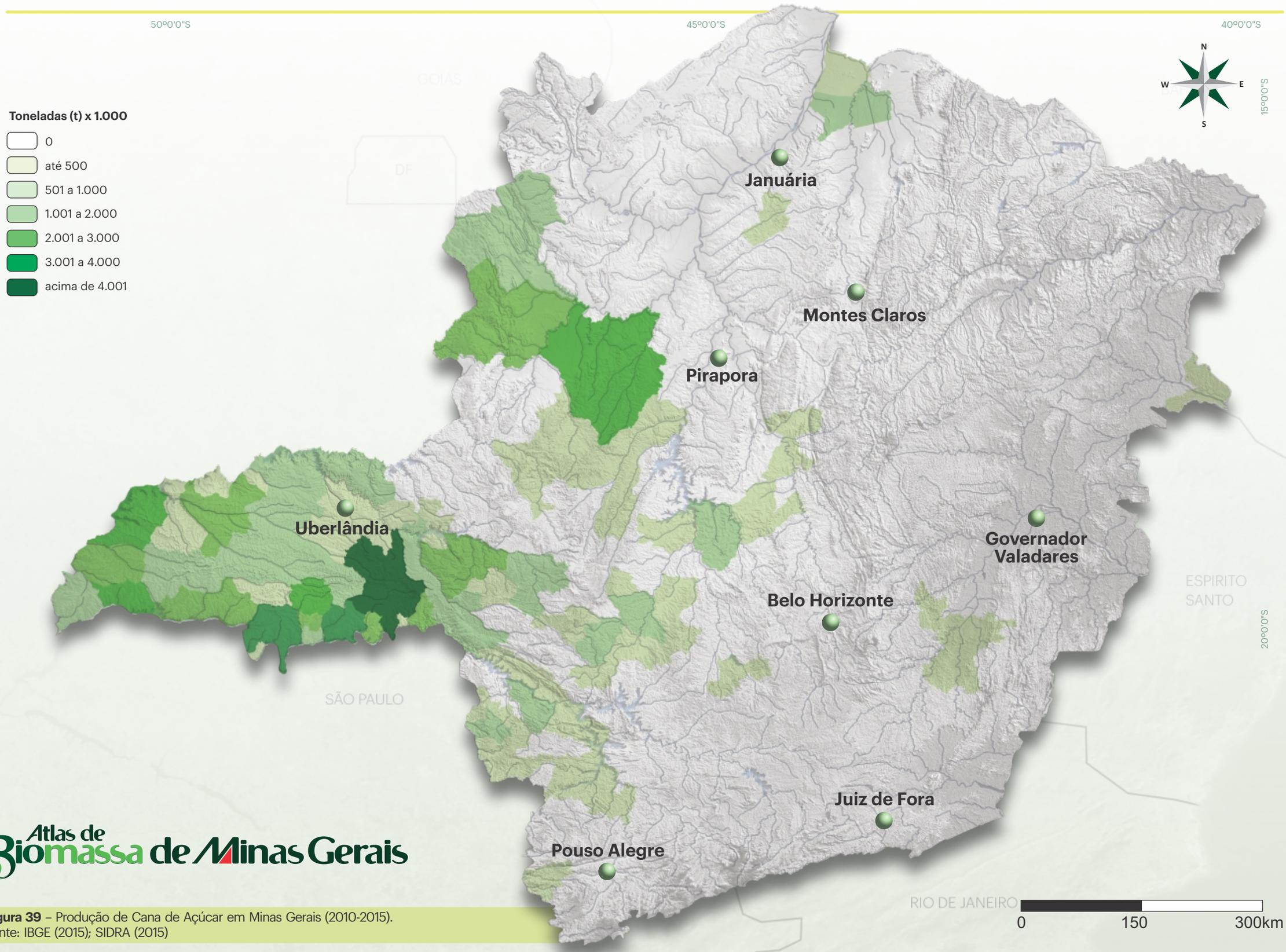
Vinhaça

A vinhaça é um resíduo orgânico resultante do processo de destilação do mosto para produção de álcool. É rica em nitrogênio, fósforo e potássio, e devido a isso, vem sendo empregada como fertilizante nas lavouras de cana (GRANATO & SILVA, 2002). Além dos nutrientes, a vinhaça contém compostos orgânicos (ácidos orgânicos, álcoois, glicerol, etc) que podem ser convertidos em metano por microrganismos anaeróbios, o que permite a produção de energia renovável por meio da qual destilarias podem melhorar a sua economia e contribuir para um ambiente sustentável (SILVIUS et al., 2016). Antes considerada a grande vilã dos resíduos industriais do setor sucro-alcooleiro, a vinhaça tem recebido o título de subproduto ao invés de resíduo industrial, devido à descoberta de utilizações como a produção de energia elétrica alternativa, sem causar danos ao meio ambiente (GRANATO & SILVA, 2002). De acordo com Lamo (1991), para cada litro de álcool produzido são gerados de 10 a 14 litros de vinhaça. Cada tonelada de cana pode gerar 909,9x10³ kcal de energia (álcool + biogás), sendo que o biogás equivale a 7,5% desse total (LAMO, 1991).

O biogás produzido a partir da digestão anaeróbia da vinhaça pode permitir a geração de energia elétrica, pela utilização de turbinas a gás (GRANATO & SILVA, 2002). É válido ressaltar que a produção de biogás é uma das vantagens da biodigestão anaeróbia (alta redução de DBO, produção de biofertilizante, pequena produção de lodo, baixos custos operacionais e de investimento, possibilidade de sistemas descentralizados de tratamento), cuja finalidade maior é o tratamento dos efluentes (POMPEMEYER & SILVA JUNIOR, 2003).

A relação etanol/biogás (1 m³ de etanol = 185 m³ de biogás - 60% de metano), permite estimar o potencial de produção de metano a partir da vinhaça gerada na produção do etanol proveniente da cana-de-açúcar (POMPEMEYER & SILVA JUNIOR, 2003). O poder calorífico do biogás depende do teor de metano e do grau de umidade do gás (NOGUEIRA, 1986). O valor frequentemente adotado para o biogás, com 60% de metano é de 5.500 kcal/m³, que se desumidificado, com consequente remoção do dióxido de carbono, pode chegar a valores próximos ao do metano puro, isto é, 9.000 kcal/m³ (POMPEMEYER & SILVA JUNIOR, 2003).

A quantidade de biogás que pode ser produzido a partir de 1 m³ de vinhaça varia entre 7 e 15 Nm³, o que corresponde a 37~78 kW de energia térmica ou 17~37 kW de energia elétrica (SILVIUS et al., 2016). O biogás produzido pode ser usado em caldeiras (substituindo o bagaço), motores estacionários para gerar energia elétrica ou como combustível na frota de caminhões e tratores (substituindo o diesel) (SILVIUS et al., 2016).



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 39 – Produção de Cana de Açúcar em Minas Gerais (2010-2015).
Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)

3.3 - Milho

O milho é originário da América Central, (*Zea mays*) pertence à família Gramineae (ROCHA et al., 2017). A Figura 40 apresenta o milho e sua lavoura.

Figura 40 – A cultura do milho e sua lavoura.

Cereal básico para a nutrição humana e animal, matéria prima para a fabricação do etanol O milho é uma gramínea que pode ser cultivada em vários tipos de clima, solo ou altitude, sua produtividade varia de acordo com os fatores climáticos, fertilidade do solo e gerenciamento das colheitas (EPE, 2014). Devido aos diferentes usos tanto na alimentação humana, animal, indústria e ainda bioenergia, o milho tem grande destaque. Somente do milho obtêm-se mais de 160 produtos diferentes para aproveitamentos distintos (EMATER, 2017).

Um dos mais importantes produtos no conjunto da agricultura brasileira, sendo o terceiro produto agrícola mais produzido, o milho fica atrás somente da cana de açúcar e da soja. É produzido em praticamente todas as grandes regiões, e representa cerca de 40% do atual volume produzido de grãos e 28% da área plantada. O cereal é o mais forte insumo do setor de criação animal – principalmente na alimentação de aves e suínos – sobressaindo-se também na alimentação humana, sob a forma de seus derivados: fubá, farinha, óleo, amido, dentre outros. No que se refere ao destino da produção de milho no Brasil, na média dos últimos cinco anos, 59% são voltados à alimentação animal, com a avicultura representando 34%, a suinocultura 13% e a bovinocultura 7%. Já o consumo industrial corresponde a cerca de 7,5% da produção total, as exportações, a 28% e o consumo humano, a 3%. A parcela restante é direcionada a outros setores (CONAB, 2016).

Cultivo

O milho é um dos principais cereais cultivados no Brasil e no estado de Minas Gerais, tanto em área plantada, quanto em produção (EMATER, 2017). É cultivado em mais de 90% das propriedades rurais de Minas Gerais, com área total de 1.281.452 hectares (SIDRA, 2016).

O Brasil possui 15.846.517 ha de área plantada com milho (SIDRA, 2016). Na Tabela 8 encontram-se os valores de áreas plantadas da cultura por estado.

Brasil			15.846.517
Estado	**Área Plant. (hectares)**	**Estado**	**Área Plant. (hectares)**
Mato grosso	3.570.606	Pernambuco	194.147
Paraná	2.439.400	Rondônia	175.952
Mato Grosso do Sul	1.681.672	Sergipe	175.135
Goiás	1.409.102	Tocantins	162.078
Minas Gerais	1.281.452	Paraíba	65.286
Rio Grande do Sul	854.793	Rio Grande do Norte	42.915
Bahia	814.311	Acre	41.876
São Paulo	808.374	Alagoas	34.224
Ceará	495.927	Espírito Santo	18.642
Maranhão	456.746	Amazonas	6.604
Piauí	409.277	Roraima	5.221
Santa Catarina	404.487	Rio de Janeiro	2.440
Pará	228.871	Amapá	1.757

Tabela 8 – Estados brasileiros e respectivas áreas plantadas de milho (hectares) para o ano de 2015 - Fonte: SIDRA (2016)

Na Figura 41 é apresentado o percentual de área plantada nos principais estados produtores de milho do país no ano de 2015.

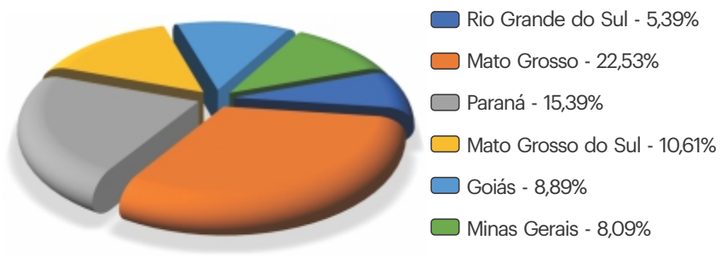


Figura 41 – Percentual de cultivo de milho nos principais estados produtores no Brasil. - Fonte: SIDRA (2016).

O Mato Grosso é o principal estado produtor de milho do país com mais de três milhões de hectares de área plantada correspondendo sozinho à cerca de 22% do total de área plantada no Brasil.

Minas Gerais ocupa a quinta posição no ranking nacional com expressiva área plantada da cultura com destaque para o município de Uberaba com 51.000 de hectares plantadas correspondendo a cerca de 4% do total do estado (TABELA 9).

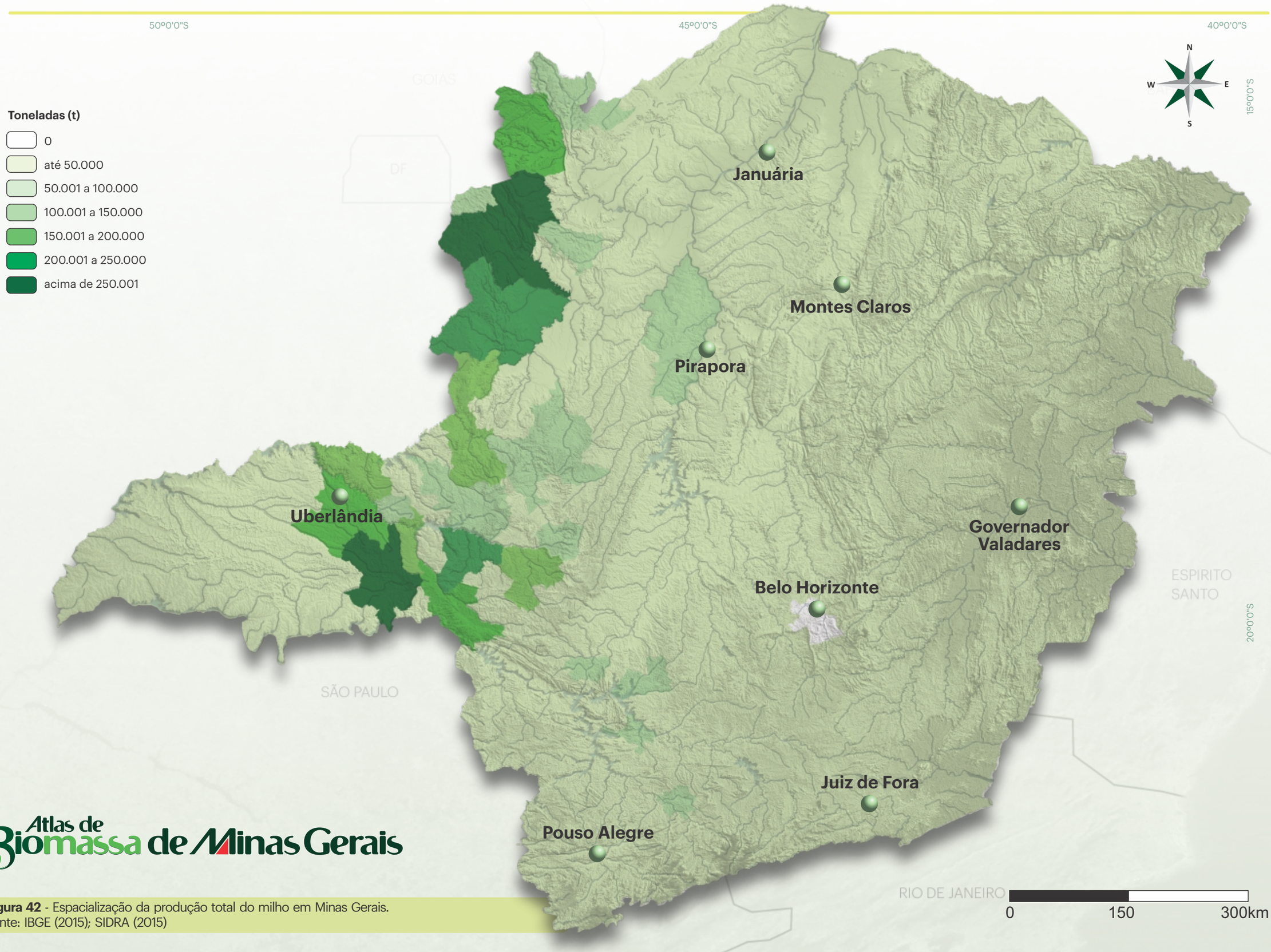
Município	**Área Plantada**	**Município**	**Área Plantada**
Uberaba	51.000	Sacramento	24.236
Unaí	48.000	Uberlândia	23.000
Paracatu	42.400	Guarda-Mor	22.000
Buritis	35.500	Coromandel	21.000
Perdizes	28.500	Ibiá	20.000

Tabela 9 – Principais municípios do estado de Minas Gerais com cultivo de milho e respectivas áreas plantadas (hectares) para o ano de 2015. Fonte: SIDRA (2016).

Em nível mundial, o Brasil ocupa a terceira posição entre os países produtores de milho, ficando atrás somente dos Estados Unidos e da China (FAO, 2014). A produtividade do milho varia muito com relação à fertilidade de solo e à gerência das colheitas (EPE, 2014). Oito estados concentram cerca de 89,5% da produção nacional: Paraná, Mato Grosso, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Goiás, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Santa Catarina (EPE, 2014). A produção média das colheitas é de 4,31 t/ha, sendo que esta varia entre 1,61 t/ha na região Nordeste até 5,07 t/ha na região Sudeste (EPE, 2014).

A geração de resíduos agrícolas que permanecem no campo derivados da cultura do milho pode ser dividida em sabugo e colmo, folha e palha, sendo esta última a cobertura da espiga. A palha é obtida ainda durante a colheita e na maioria dos casos não possui uma utilização definida, tornando-se um resíduo (ROCHA et al. 2017). Koopmans e Koppejan (1997) mencionam uma produção de 2,2 t de biomassa por tonelada de milho, com umidade em torno de 11%, o que equivale a 1,96 t de biomassa em base seca, por tonelada de milho.

Em Minas Gerais, para o ano de 2015, a produção de milho foi de 6.839.297 toneladas (SIDRA, 2016). A produção média de milho entre os anos 2010-2015 pode ser observada na Figura 42.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 42 - Espacialização da produção total do milho em Minas Gerais.
Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)

3.4 - Soja

A soja (*Glycine max L*) é um grão rico em proteínas e pertence à família *Fabaceae* (leguminosas), assim como feijão, lentilha e ervilha. É a cultura agrícola que apresentou maior crescimento nas últimas três décadas, com 49% da área plantada do país, de acordo com o Ministério da Agricultura (2016). A época de semeadura é um dos fatores que mais influenciam o rendimento da soja. O aumento da produtividade está associado aos avanços tecnológicos, ao manejo e eficiência dos produtores. O grão é componente essencial na fabricação de rações animais, e, além disso, vem apresentando uso crescente na alimentação humana, o que faz com que sua produção esteja em franco crescimento (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2016). Apesar da soja ser chamada de oleaginosa, seu principal produto derivado é o farelo proteico, que representa entre 75% e 80% do grão e é utilizado largamente na nutrição animal (HIRAKURI et al., 2010). De uma saca de soja (60kg), tem-se 8 litros de óleo e 52 kg de farelo, com aproximadamente 46% de proteína na matéria seca.

O Brasil é o segundo maior produtor mundial do grão, com uma produtividade de 2.998 kg/ha (CONAB, 2016). Como mencionado, o óleo é um subproduto ou coproduto (CEMIG, 2012). Portanto, não se produz soja para obter o óleo. A sua hegemonia advém uma cadeia produtiva bem estruturada, com tecnologias de produção bem definidas e modernas, além de ampla rede de pesquisa (DALL'AGNOL, 2007).

Cultivo

Minas Gerais possui importante participação na produção agrícola nacional. A Tabela 10 apresenta as principais culturas produzidas no Estado no ano de 2014 e suas respectivas áreas plantadas e colhidas e quantidade produzida.

Cultura	Área Plantada (ha)	Área Colhida (ha)	Quantidade Produzida (t)
Algodão Herbáceo (em caroço)	1.047.622	1.046.801	4.066.791
Arroz (em casca)	2.162.178	2.138.397	12.301.201
Cana-de-açúcar	10.161.622	10.093.171	748.636.167
Milho (em grão)	15.846.517	15.406.010	85.284.656
Soja (em grão)	32.206.387	32.181.143	97.464.936
Café	1.988.272*	1.979.714	2.645.494

* Área destinada à colheita.

Tabela 10 - Principais culturas produzidas em Minas Gerais em 2016, com destaque para a soja. - Fonte: Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA, 2016)

O Brasil possui 33.245.190 ha de área plantada com soja (SIDRA, 2016). Na Figura 43 é apresentado o percentual dessa área plantada nos principais estados produtores de soja do país.

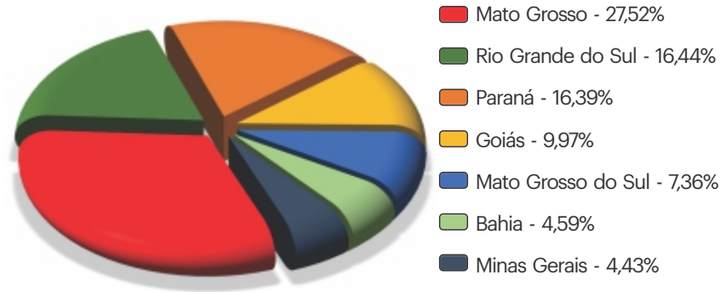


Figura 43 – Percentual de cultivo de Soja nos Estados cuja área plantada foi maior que 1.000.000 ha. - Fonte: Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA, 2016).

A área cultivada de soja no Estado de Minas Gerais sofreu considerável aumento nos últimos anos. Essa expansão ocorreu sobretudo nas áreas de pastagens e em locais onde anteriormente eram cultivados milho e café com pouca produtividade (CISoja, 2016). Diante disso, o estado é destaque na Região Sudeste, sendo responsável por 4,43% do cultivo de soja no Brasil, o que corresponde a 1.472.224 ha de área plantada (SIDRA, 2016). Uberaba, Uberlândia, Unaí, Buritis e Guarda-Mor são os municípios com maior área (acima de 50.000 ha) de cultivo de soja em Minas Gerais.

Produção

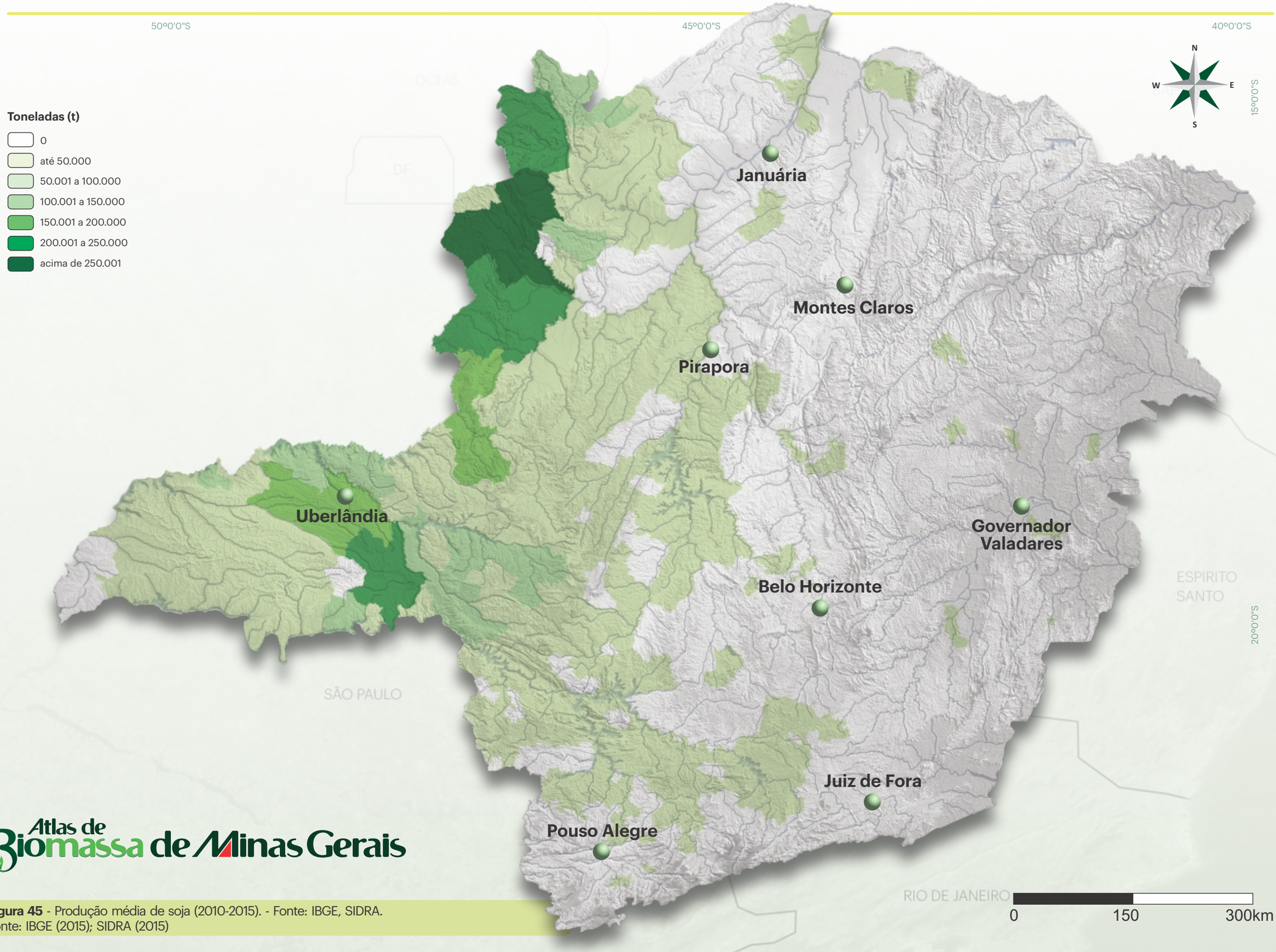
O Brasil é o segundo país na produção e processamento mundial de soja, sendo também o segundo maior exportador de grão, óleo e farelo de soja. Estima-se que a cadeia produtiva da soja reúna no País mais de 243 mil produtores, e um mercado de 1,4 milhões de empregos. Atualmente, 70% da produção de grão, óleo e farelo de soja são exportados (APROSOJA BRASIL, 2014). De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2016) a indústria nacional produz cerca de 5,8 milhões de toneladas de óleo comestível e 23,5 milhões de toneladas de farelo proteico, contribuindo para a competitividade nacional na produção de carnes, ovos e leite. A soja contribui para colocar Minas Gerais em posição de destaque no ranking das exportações agrícolas. O estado ocupava o quinto lugar, com vendas externas que chegaram a US$ 686,58 milhões de dólares em julho de 2016, com o complexo da soja ocupando o segundo lugar, com US$ 134,95 milhões, atrás apenas do café com exportações no valor de US$ 261,74 milhões (MAPA, 2016). Do montante relativo à soja, US$ 124,87 milhões são relacionados à venda de grãos, US$ 10 milhões ao farelo de soja e US$ 72 mil ao óleo de soja (MAPA, 2016).

Entre os estados brasileiros, verifica-se que o maior produtor é Mato Grosso, seguido pelo Rio Grande do Sul, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Bahia. Em Minas Gerais o município com a maior produção é Unaí, seguido de Paracatu, Uberaba, Buritis, Guarda-Mor e Coromandel.

O aproveitamento energético pode ser realizado a partir da palha (resíduos provenientes do processo de colheita: folhas, caule, talos e cascas) ou então da extração do óleo. A Figura 44 apresenta o destino e os usos da soja brasileira.

Figura 44 - Uso e destino da soja brasileira. - Fonte: Adaptado de Aprosoja Brasil (2014).

Como podemos observar na Figura 44, o farelo da soja corresponde a 79% da produção, sendo que uma parte é exportada e outra é consumida, basicamente, para ração animal. A produção média da soja por município em Minas Gerais (2010-2015) é apresentada na Figura 45.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 45 - Produção média de soja (2010-2015). - Fonte: IBGE, SIDRA.
Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)

3.5 - Vegetais Lenhosos

A madeira é um material amplamente utilizado e a sua aplicação vai desde a cocção de alimentos em fogão à lenha até usos mais nobres em serraria, produção de celulose, produção de carvão em substituição aos combustíveis fósseis, dentre outros. A Figura 46 apresenta a cadeia produtiva da madeira, que pode ser dividida em três grandes grupos segundo sua destinação.

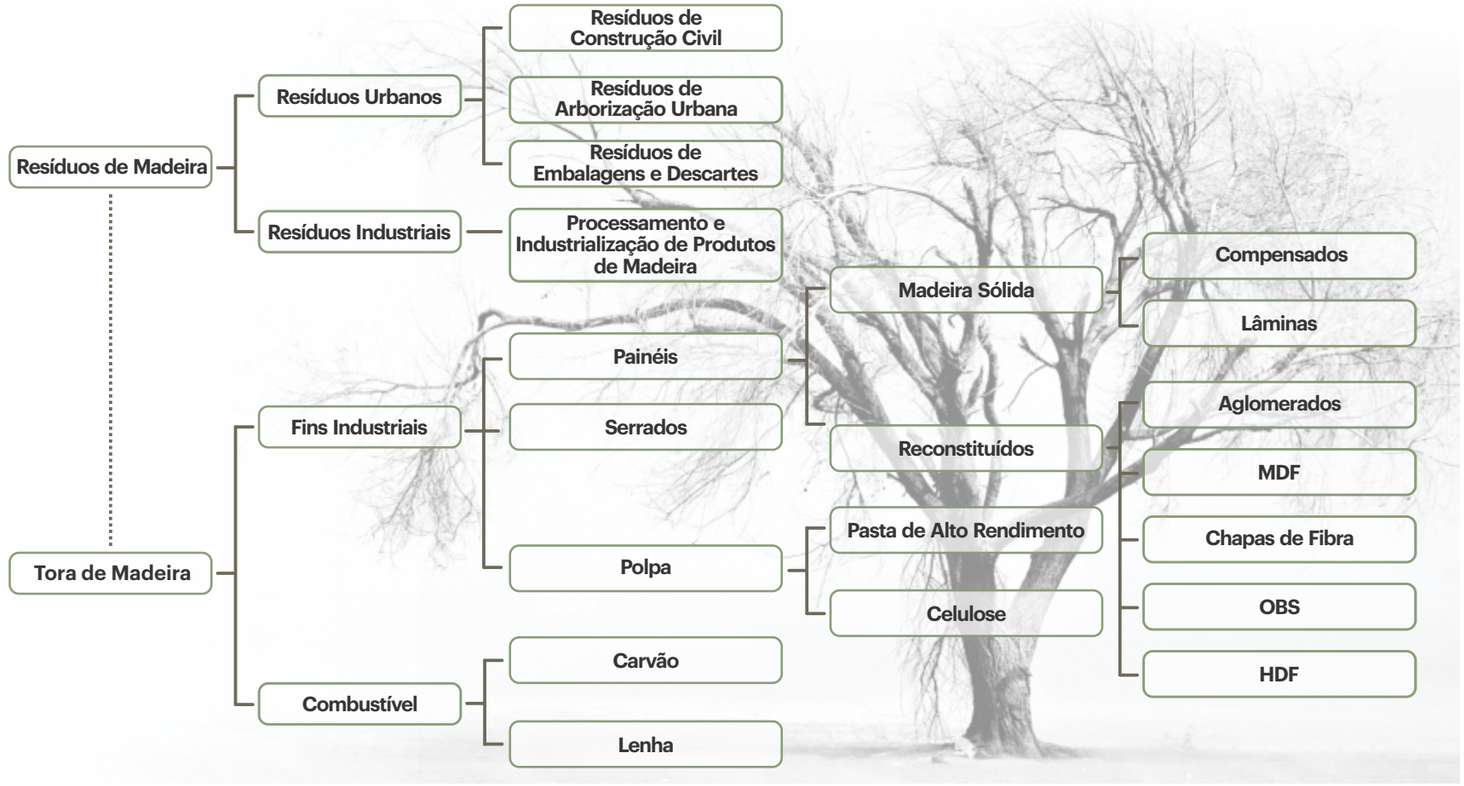


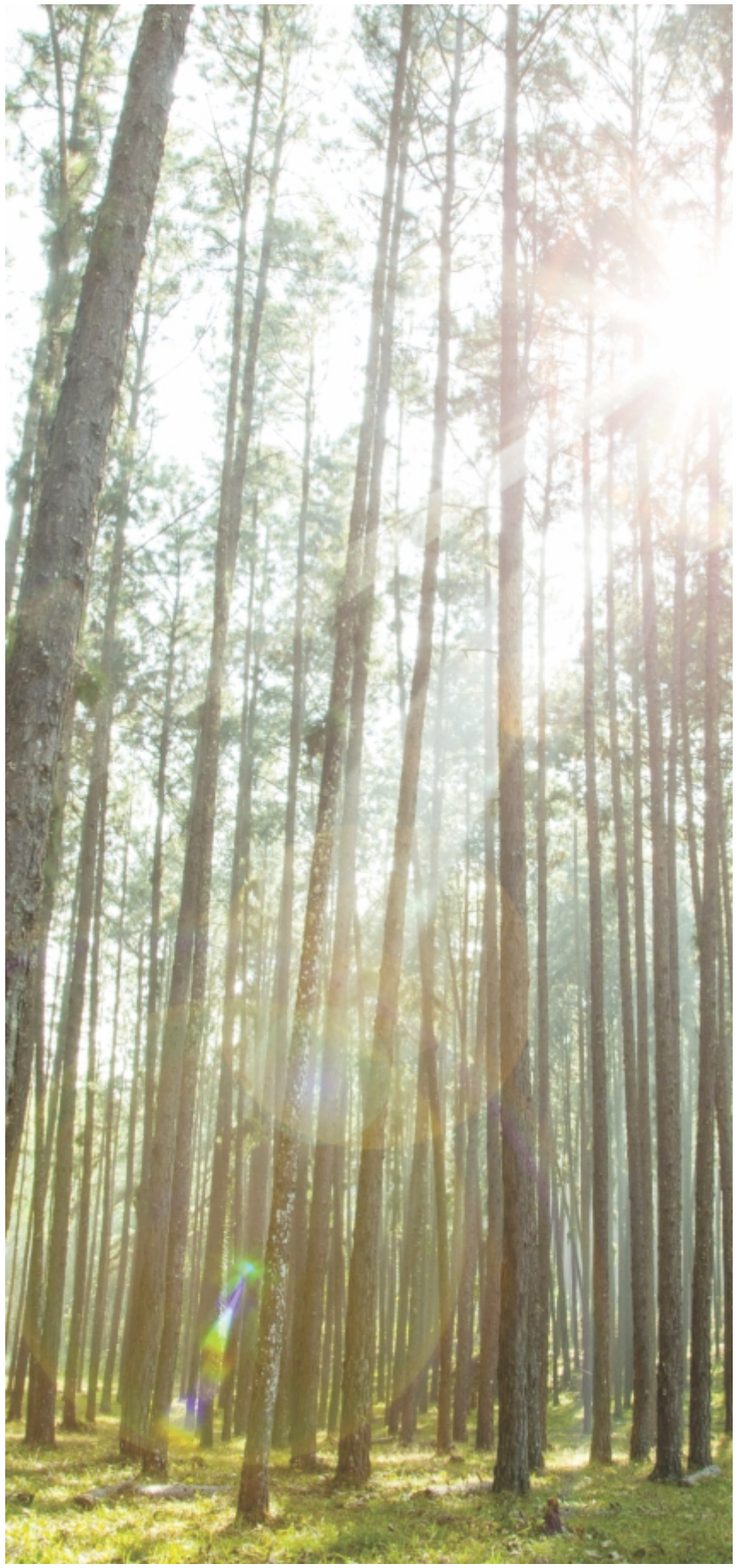
Figura 46 - Cadeia Produtiva da Madeira. - Fonte: Wiecheteck, 2009 (Adaptado).

Na área energética, a madeira, como combustível, é tradicionalmente chamada de lenha e nessa forma, continuamente ofereceu histórica contribuição para o desenvolvimento da humanidade (BRITO, 2007), e atualmente vem ganhando espaço, novamente, principalmente no que tange a mitigação dos gases de efeito estufa.

A madeira é uma fonte de energia primária e renovável, que além da energia disponível, atua como importante fator de fixação do carbono atmosférico contribuindo, dessa forma, com a redução do efeito estufa. Devido a sua variabilidade e gama de espécies adaptadas a diferentes condições ambientais, a madeira apresenta-se com um material de extraordinário valor ambiental, social e econômico. A madeira é sem dúvida o mais antigo combustível usado pelo homem.

A biomassa lenhosa pode ser convertida em combustível, sob a forma sólida, líquida ou gasosa, em processos que variam de simples fornos ou até sofisticadas unidades industriais. Estes processos podem ser classificados em: carbonização ou pirólise, combustão, gaseificação e hidrólise ácida ou enzimática. A combustão ou queima direta é a forma mais tradicional de uso da energia da lenha, porém, a gaseificação e a pirólise são processos termoquímicos que têm recebido especial atenção nos últimos anos. Logo, as novas tecnologias de conversão da lenha em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos de alto valor agregado, têm ganhado importância mundial (CENBIO, 2015).

Cabe, também, relatar que a geração de resíduos de madeira na atividade industrial Brasileira é alta, porém seu baixo aproveitamento ainda é incipente, podendo a vir resultar em danos ambientais, já que apenas uma parcela do volume de resíduos gera aproveitamento econômico. Os resíduos são processados como matéria prima para diversos fins, incluindo o uso energético, contribuindo positivamente na substituição de 14-27 milhões de tep.ano^{-1} (KARJALAINEN et al., 2004, apud WIECHETECK, 2009). Na Figura 47 são apresentadas as principais formas de utilização dos resíduos provenientes das atividades florestais.



Fontes de Biomassa

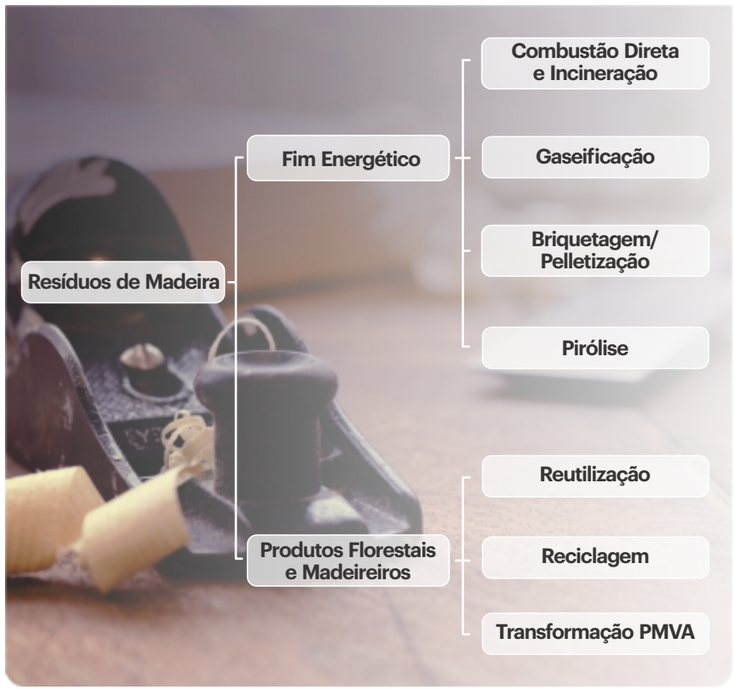


Figura 47 - Destino do Resíduo de Madeira. - Fonte: Wiecheteck, 2009 (Adaptado).

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Mirtaceae* e conta com cerca de 600 espécies e grande número de variedades e híbridos (TRUGILHO et al., 1996). Esse gênero foi introduzido no Brasil no início do século XIX, com evidências de que as primeiras árvores teriam sido plantadas em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, com a finalidade de ornamentação. Porém, foi somente no inicio do século XX, que foi plantado com o objetivo comercial (PEREIRA et al., 2000).

No Brasil, o gênero *Eucalyptus* é o mais estudado e implantado comercialmente, sendo que no ano de 2015 o total de áreas plantadas foi de 5,6 milhões de hectares. Nos últimos cinco anos, o crescimento da área de eucalipto no Brasil foi de 2,8% a.a. Minas Gerais aparece como o principal estado produtor de eucalipto, com 24% da área plantada no país, e o Mato Grosso do Sul se destaca com o plantio de 450 mil hectares nos últimos cinco anos (IBÁ, 2016).

Ressalta-se que a área plantada desse gênero continua em processo de expansão, todavia, em um ritmo menos acelerado devido a crise econômica brasileira. Porém, salienta-se que seu rápido crescimento, alta produtividade, ampla diversidade de espécies e clones, adaptabilidade e diversificação quanto aos usos da madeira são os principais fatores que contribuem para a expansão contínua da área plantada deste gênero.

De acordo com a literatura, as espécies de eucalipto mais utilizadas em pesquisas, e consequentemente nos plantios, para fins energéticos, são: *Eucalyptus grandis* (FREDERICO, 2009), *Eucalyptus urophylla* (ANDRADE, 2009), Eucalyptus *camaldulensis* (PINHEIRO et al., 2005), *Eucalyptus cloeziana* (PINHEIRO et al., 2005); *Eucalyptus pellita* (OLIVEIRA et al., 2010); *Eucalyptus saligna* (TRUGILHO et al., 2001); híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (TRUGILHO et al., 2005; CAMPOS, 2008; FREDERICO, 2009; ARANTES, 2009, SANTOS, 2010), híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* (TRUGILHO et al., 2005; SANTOS, 2010; ROCHA, 2011).

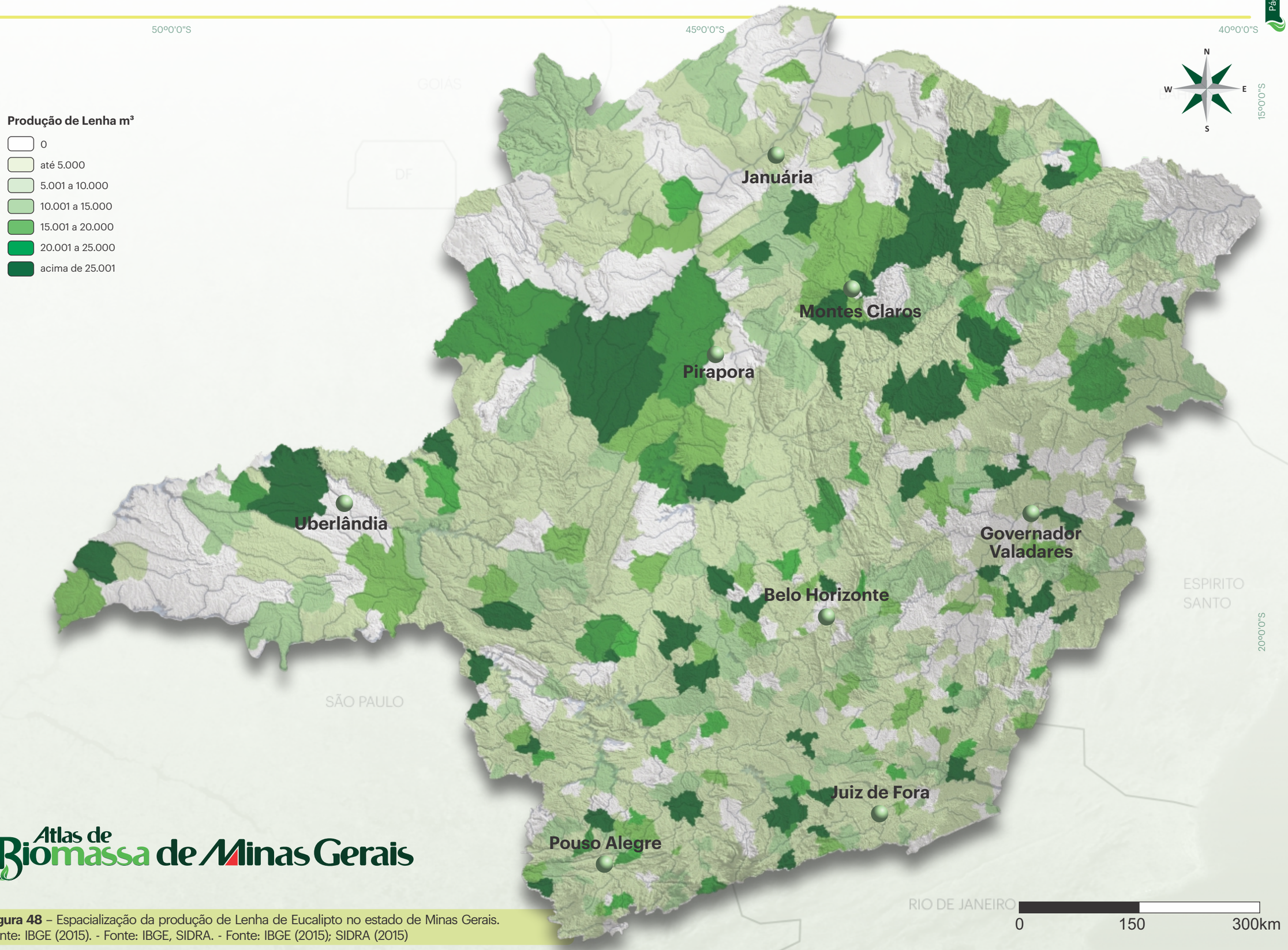
O eucalipto possui uma ampla plasticidade e dispersão mundial, pois cresce satisfatoriamente em diferentes situações edafoclimáticas, passando desde áreas pantanosas até muito secas, de solos arenosos, de baixa à de alta fertilidade, ocupando, portanto, ambientes altamente variáveis, tanto em termos de precipitação quanto temperaturas (SANTOS et al., 2001; SCHUMACHER et al., 2005; HASSE, 2006).

A cobertura florestal do território brasileiro, associada às excelentes condições edafoclimáticas para a silvicultura, confere ao país grandes vantagens para a atividade florestal, comparado ao resto do mundo, tendo como consequência, uma boa participação no contexto da geração de energia oriunda de fontes renováveis. Vale mencionar que a produtividade das florestas de eucalipto e Pinus no Brasil é superior àquelas observadas nos demais países com tradição na exploração florestal conforme pode ser observado na Tabela 11.

Espécies	País	Idade (Anos)	Produtividade m³/ha/ano
Folhosas			
Eucalyptus spp.	Brasil	7	35 – 55
Eucalyptus spp.	África do Sul	8 – 10	20
Eucalyptus spp.	Chile	10 – 12	30
Eucalyptus spp.	Portugal	12 – 15	12
Eucalyptus spp.	Espanha	12 – 15	10
Bétula	Suécia	35 – 40	5,5
Bétula	Finlândia	35 – 40	4
Coníferas			
Pinus spp.	Brasil	15	30
Pinus radiata	Chile	25	22
Pinus radiata	Nova Zelândia	25	22
Pinus elliottii/taeda	USA	25	10
Oregon pine	Canada - costa	45	7
Picea abies	Suécia	70 - 80	4
Picea abies	Finlândia	70 - 80	3,6
Picea glauca	Canada - costa	55	2,5
Picea marina	Canada - leste	90	2

Tabela 11 - Produtividade florestal no Brasil e em outros países.
Fonte: MME/EPE (2015)

A Figura 48 apresenta a produção média de lenha de eucalipto no Estado de Minas Gerais entre os anos de 2013 a 2015.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 48 – Espacialização da produção de Lenha de Eucalipto no estado de Minas Gerais.
Fonte: IBGE (2015). - Fonte: IBGE, SIDRA. - Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)

Carvão

O carvão vegetal é considerado um dos insumos mais importantes da indústria siderúrgica brasileira, tendo registrado um consumo de 4,6 milhões de toneladas em 2015, no entanto houve uma queda de 13,2% em relação a 2014. A redução do consumo pode ser justificada pela retração da atividade industrial, em especial do setor automotivo, e devido a pouca competitividade dos produtos siderúrgicos no mercado internacional. De todo o carvão consumido em 2015, 82% foi produzido de madeira proveniente de florestas plantadas .

O processo de carbonização ou pirólise lenta da madeira consiste no seu aquecimento, a temperaturas acima de 200ºC e inferior a 400ºC, na presença controlada de oxigênio, promovendo modificações dos seus componentes, cujo objetivo é aumentar o teor de carbono na massa resultante do processo, o carvão vegetal. A ocorrência desse processo está intimamente relacionada à composição química dos três principais componentes da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina, além de sofrer influência das suas características físicas e anatômicas.

Segundo Rezende (2006), o processo de carbonização da madeira ocorre em quatro fases: na primeira fase ocorre a secagem da madeira até a temperatura de 110ºC, havendo somente liberação de água. Na segunda fase, que varia de 110 a 250ºC, tem início a liberação da água de constituição pela decomposição da celulose e hemiceluloses e pouca massa é perdida até 250ºC. Forma-se a madeira semicarbonizada ou atiço. A terceira fase ocorre entre 250ºC e 350ºC, com a intensificação da decomposição da celulose e hemiceluloses, havendo expressiva perda de massa e formação de gases, óleo e água. Ao atingir a temperatura de 350ºC o carvão tem aproximadamente 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta. Na quarta fase, ocorre o resfriamento do carvão.

De modo simples, pode-se dizer que a reação de carbonização da madeira consiste, basicamente, em concentrar carbono e expulsar oxigênio pela ação do calor, com consequente aumento do conteúdo energético do produto. Na madeira, os teores de carbono e oxigênio elementar são, em média, respectivamente, de 49% e 44%. Depois de carbonizada, esses teores passam, em média, no carvão vegetal, para 82% e 13,7%. O carvão retém 57% do carbono da madeira, enquanto 89% do oxigênio são volatilizados.

O processo de carbonização da madeira e obtenção do carvão se dá por meio de fornos que, se diferenciam de acordo com características específicas de cada um. Os mais utilizados no Brasil são os fornos "rabo quente", de superfície, de encosta e retangulares. O ciclo completo de carbonização nos fornos retangulares tem duração média de 13 dias, incluindo as etapas de carregamento, ignição, carbonização, resfriamento do leito de carvão e descarga, sendo normalmente quatro dias para carbonizar a madeira, oito dias para o resfriamento do forno e um dia para carregamento e descarregamento do forno. O rendimento gravimétrico em carvão vegetal desses fornos varia de 30 a 35%. Atualmente, estão sendo desenvolvidos queimadores de gases da carbonização para redução de emissões e aproveitamento de energia térmica para secagem da madeira ou produção de energia elétrica (Figura 49). O modelo mais simples de forno de alvenaria e ainda utilizado pelos pequenos produtores é o forno denominado circular de superfície (Figura 50).

Figura 49 – Queimador dos gases residuais desenvolvido no projeto de P&D Cemig GT 358 (PD-4951-0358/2010), em parceria com a ArcelorMittal BioFlorestas. - Fonte: Cemig.

Figura 50 – O modelo mais simples de forno de alvenaria e ainda utilizado pelos pequenos produtores é o forno circular de superfície.

A Figura 51 apresenta um balanço de massa típico da produção de carvão vegetal, segundo BRIANE, D. e DOAT, J. (1985).

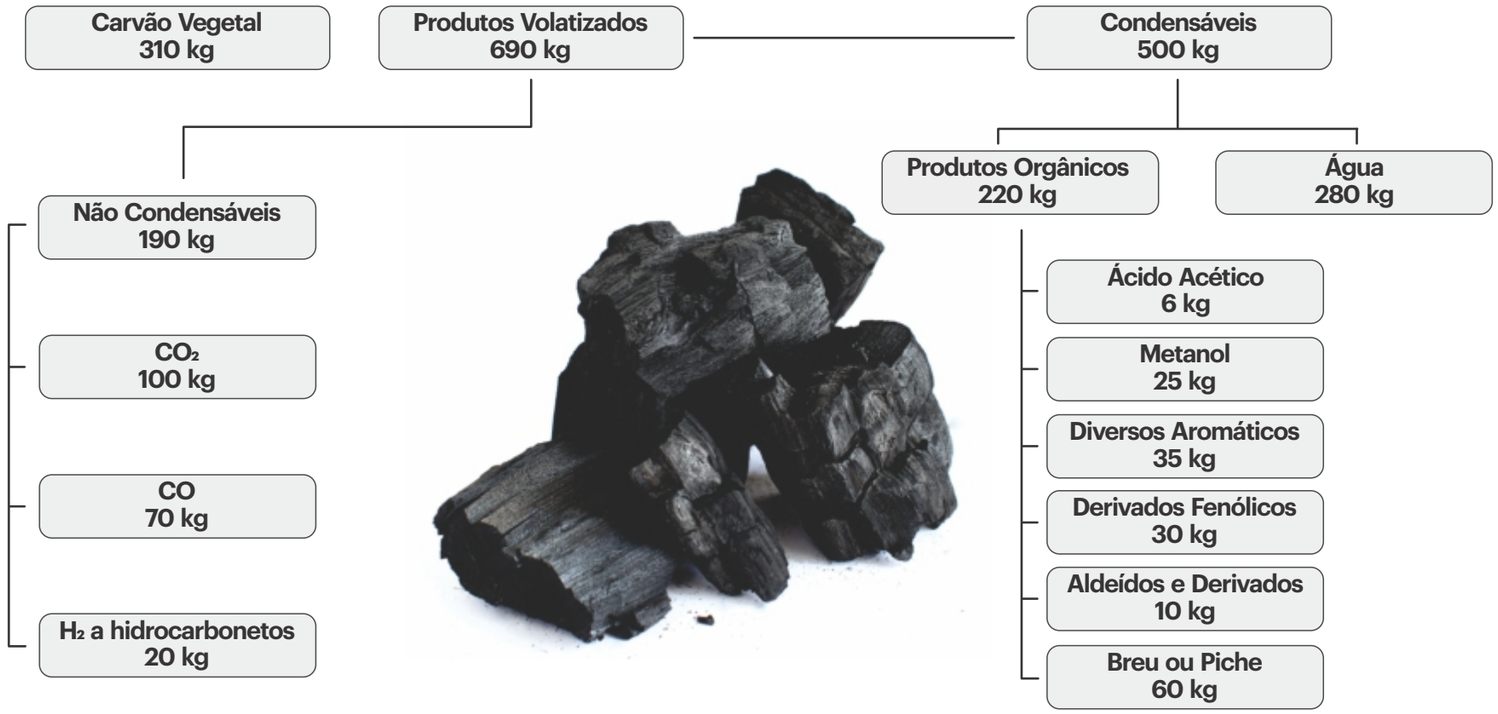
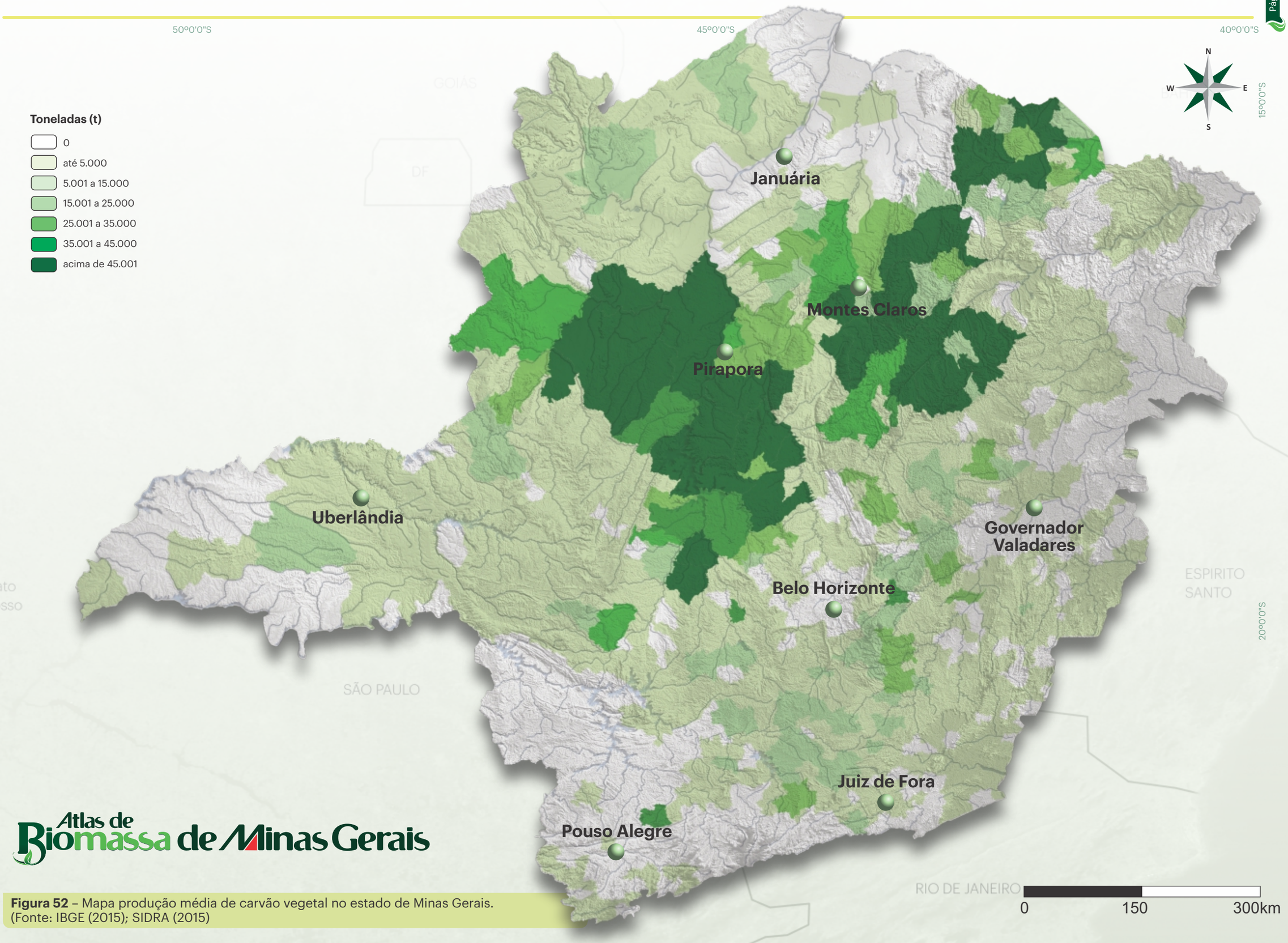


Figura 51 - Balanço Global da conversão de madeira em carvão vegetal.

A Figura 52 apresenta a produção média de carvão vegetal com madeira de eucalipto no estado de Minas Gerais (2013 a 2015).



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 52 – Mapa produção média de carvão vegetal no estado de Minas Gerais.
(Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)

Fornalhas para queima de gases da carbonização

Os gases gerados durante o processo de carbonização são substâncias combustíveis ricas em carbono e hidrogênio, que sob condições adequadas de temperatura e pressão são capazes de sofrer reações químicas na presença de oxigênio, liberando energia sob a forma de luz e calor. Na carbonização da madeira são gerados gases não condensáveis, sendo os principais CO, CO_2, H_2 e CH_4. No caso de queima completa desses gases, as emissões seriam constituídas apenas de CO_2 e vapor de água.

Com o objetivo de diminuir as emissões de gases gerados durante a carbonização para a atmosfera, tem sido realizada a combustão desses em queimadores de gases ou fornalhas. Queimadores ou fornalhas são dispositivos projetados visando à maior eficiência da combustão e possibilidade de aproveitamento da energia térmica liberada durante o processo de combustão (MAGALHÃES, 2007).

Os queimadores acoplados a fornos de carbonização têm o objetivo de incinerar os gases gerados durante o processo, transformando a poluição em energia na forma de calor. Estes equipamentos conferem as unidades de produção de carvão vegetal um aspecto limpo e contribuem para o processo de carbonização, auxiliando na tiragem de gases do interior do forno para a fornalha em função da pressão negativa gerada no sistema pela chaminé do queimador, conforme observado na Figura 53.

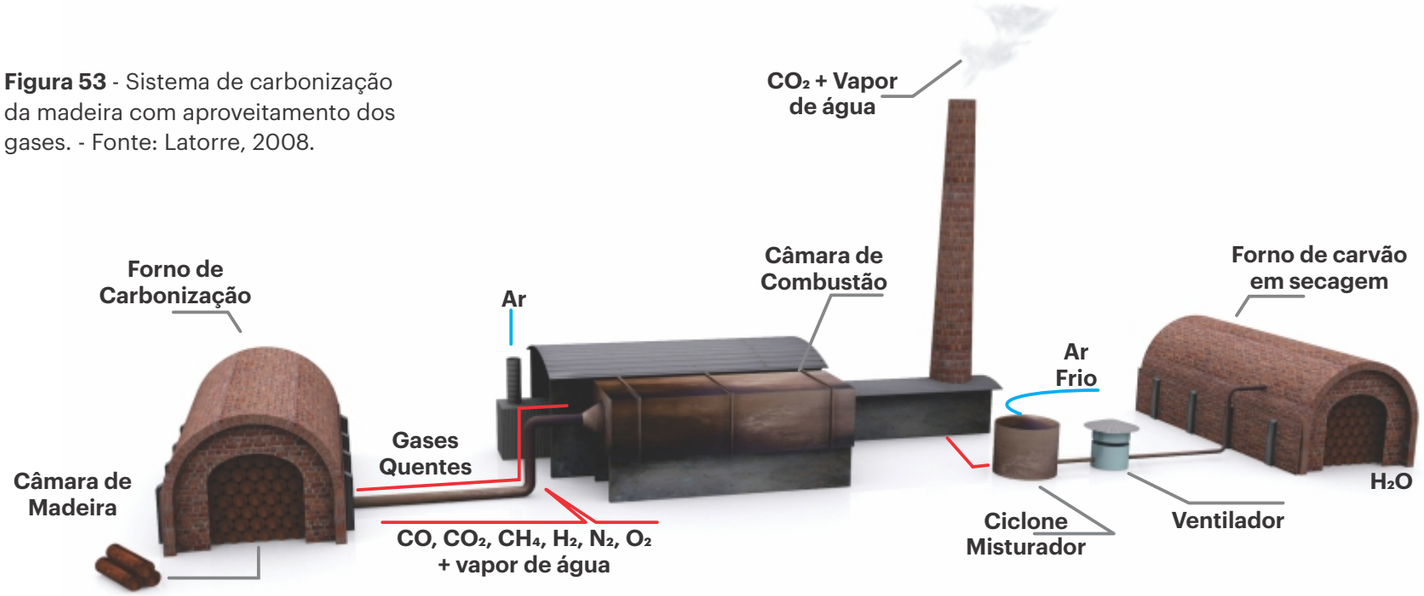


Figura 53 - Sistema de carbonização da madeira com aproveitamento dos gases. - Fonte: Latorre, 2008.

Outros produtos energéticos da madeira

Briquetes

A produção de briquetes a partir de resíduos florestais e agrícolas tem se mostrado viável em diversas indústrias como forma de agregar valor a estes produtos. Por meio deste processo os resíduos são transformados em um produto com maior densidade energética, agregando maior valor econômico aos mesmos, minimizando os impactos ambientais gerados pela sua disposição, na maioria das vezes, inadequada, colaborando, portanto, para um processo sustentável. A fabricação de briquetes apresenta como vantagem a redução do volume dos resíduos e consequentemente o custo de transporte e o armazenamento.

A briquetagem consiste em comprimir uma massa de partículas com aplicação de pressão, o que provoca um aumento de temperatura, plasticizando a lignina, que age como um aglutinante natural, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, mas também, com forma e tamanho definidos.

A qualidade dos briquetes é diretamente influenciada pelas propriedades físicas e químicas da matéria prima utilizada, como por exemplo, a umidade, teor de cinzas, o poder calorífico, o tamanho das partículas e a densidade, bem como os parâmetros de produção.

Vários tipos de biomassa podem ser utilizados no processo de briquetagem, no entanto os resíduos de madeiras (serraria) são os predominantes nos processos de combustão, devido a sua disponibilidade e características energéticas. FROEHLICH et al. (2012) afirmam que o aproveitamento do volume total de uma tora é apenas de 40 a 60%, ou seja, de cada dez árvores cortadas apenas cinco são aproveitadas em sua totalidade. De modo geral, os resíduos gerados em uma cadeia produtiva de madeira serrada constituem-se de 7% de casca, 10% de serragem e 28% de pedaços, isto sem considerar as perdas na extração da madeira (REMADE, 2005). Ressalta-se que esses valores são variáveis de empresa para empresa.

A viabilidade econômica de uma planta de produção de briquetes depende de uma série de aspectos, como por exemplo, o custo de produção dos briquetes, os custos para a implantação da planta de briquetagem, as características da matéria-prima, a competitividade do produto no mercado, a distância de transporte ao mercado consumidor e programas de incentivos governamentais. A complexidade da planta de briquetagem influencia significativamente nos custos de investimento e deve ser avaliada em função do volume de produção previsto.

Pellets

A peletização é um processo de densificação da biomassa com o objetivo de reduzir seu volume, baratear o transporte, facilitar seu uso final, além de aumentar a quantidade de energia por unidade de volume.

Os pellets são granulados de biomassa prensada com uma forma cilíndrica de diâmetros compreendidos entre 4 e 10 mm e um comprimento variável, nunca superior a cinco vezes o seu diâmetro. A sua densidade deve ser superior a 600 kg/m³ e eles devem conter teor de umidade inferior a 12%. Na Figura 54, visualiza-se a forma dos pellets de biomassa.

Figura 54 – *Pellets* de biomassa.

A elevada densidade dos pellets e a baixa umidade permitem que se tenha elevada concentração de energia em pequeno volume. Os pellets podem ser produzidos com recurso de várias fontes de matéria-prima, como resíduos da exploração florestal e da indústria madeireira, além de resíduos agrícolas. Dessa forma, são aproveitados resíduos que normalmente não são utilizados ou devidamente valorizados. No entanto, também se pode proceder à produção de biomassa dedicada

exclusivamente para esse fim, como por exemplo árvores de espécies florestais de rápido crescimento.

A produção de pellets passa por alguns processos, a saber: a biomassa deve ser triturada, formando-se cavacos, que, em seguida, devem ser secos, até teor de umidade inferior a 15%; os cavacos, então, são moídos; a serragem, por sua vez, é prensada em peletizadoras, de modo a se obter a forma pretendida e, ao final, deve-se acondicioná-la convenientemente.

O teor de umidade nos pellets pode variar de 5 a 10% e afeta significativamente o poder calorífico, que está entre 4,7 e 5,0 MWh por tonelada de pellets.

Os pellets possuem entre 3 e 25 mm de diâmetro e o comprimento varia de 5 a 40 mm. Quando o diâmetro é maior que 25 mm, o produto é chamado de briquete. Os diâmetros mais comum dos pellets, na Europa, variam de 4 a 10 mm, mas os pellets provenientes do mesmo lote devem ter o mesmo diâmetro, resultando em um produto mais homogêneo e de mais fácil manuseio.

Os pellets são considerados combustíveis renováveis, limpos e naturais, uma vez que a quantidade de CO e CO_2 que libertam, ao serem queimados, é a mesma que a árvore absorveu durante o seu crescimento. Logo, o governo de alguns países já apresenta incentivos fiscais para as empresas que fizerem de seu uso uma realidade.

Outra vantagem dos pellets é o preço. Por serem feitos de resíduos de outras indústrias, o valor é inferior ao da grande parte dos outros combustíveis, sendo então economicamente atrativo. A instabilidade e a tendência crescente do preço do barril de petróleo também vêm contribuindo para a utilização de energias alternativas. Inclusive, o preço dos pellets é menos influenciado por crises mundiais. Logo, além de mais baratos, seu valor no mercado é considerado estável e previsível.

Dessa maneira, os pellets são considerados como combustível alternativo sustentável e com potencialidade para substituição de outros mais usados como o gás natural e o petróleo, diminuindo assim a dependência dos mesmos.

Torrefação

A torrefação pode ser definida como uma pirólise parcial da biomassa em ambiente com restrição de oxigênio. O processo ocorre entre 200 e 300 °C, sob pressão atmosférica e por curtos tempos de residência, se comparado à pirólise para produção de carvão. Na torrefação da biomassa, obtém-se material torrificado de cor amarronzada à escura, gases condensáveis ricos em ácidos orgânicos e gases não condensáveis compostos principalmente por CO e CO_2, como pode ser visto pela Figura 55 (BERGMAN et al., 2005; NHUCHHEN et al., 2014).

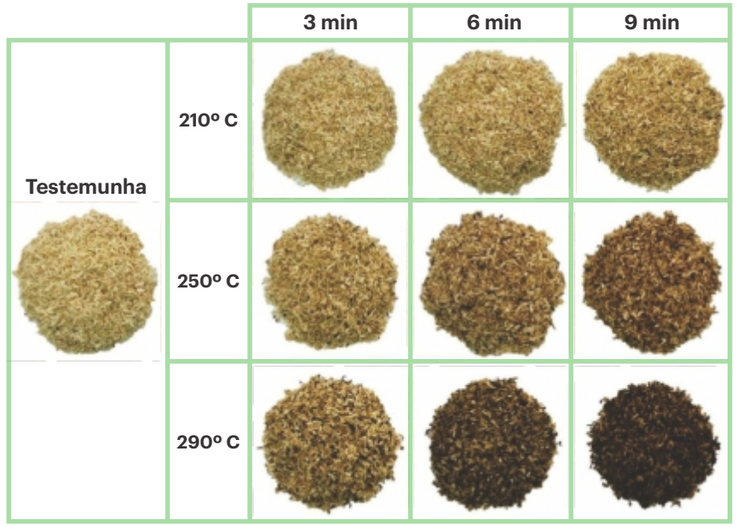


Figura 55 – Biomassa torrificada em diferentes tempos e temperaturas.

Diferentemente da pirólise convencional, na torrefação, o rendimento em massa é superior, sendo seu principal objetivo reduzir os componentes de baixo poder calorífico que estão presentes na biomassa e, assim, preservar grande parte de sua energia. De modo geral, para uma redução em massa da ordem de 20%, ocorre um decréscimo de 10% no conteúdo energético da biomassa (KOPPEJAN et al., 2012).

A biomassa torrificada apresenta propriedades competitivas frente aos combustíveis fósseis e pode ser empregada em processos de conversão térmica, como a gaseificação e cogeração, ou mesmo na conversão, em briquetes e pellets (VAN DER STELT et al., 2011). Na Tabela 12, é apresentada a comparação entre biomassa, pellets e pellets torrificados.

Parâmetro	Biomassa	Pellets	Pellets torrificados
Teor de umidade (%)	35	10	3
Poder calorífico ($MJ.kg^{-1}$)	10,5	16	21
Densidade ($kg.m^{-3}$)	550	600	800
Densidade energética ($GJ.m^{-3}$)	5,8	9	16,7

Tabela 12 – Comparação entre biomassa, pellets e pellets torrificados. Fonte: USLU et al., 2008.

A torrefação em escala comercial ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento, estando associada à produção de pellets, gaseificação e cogeração de energia e restrita a alguns países da Europa, Estados Unidos e Canadá (WILÉN et al., 2014).

No Brasil, ainda não existe plantas industriais de torrefação da madeira, sendo o desenvolvimento desta técnica mais restrita as principais empresas de bionergia no país e também aos centros de pesquisas, a exemplo da Universidade Federal de Viçosa.

O Custo de produção de torrefação é variável, pois depende tanto dos parâmetros relacionados a matéria prima e quanto do processo. Mas, segundo estudos realizados por Shah et al. (2012) o custo da tonelada de biomassa torrificada fica na faixa de 13 a 37 dolares.

Licor Negro

A produção de celulose nada mais é que a deslignificação da madeira que, para Foelkel (2009), ocorre pela gradual degradação e fragmentação da molécula da lignina. Os principais métodos químicos utilizados na deslignificação da madeira são o processo sulfito (ácido) e os processos soda e Kraft (ambos alcalinos), sendo que processo de polpação Kraft é atualmente o mais utilizado para a produção de polpa celulósica no Brasil, com mais de 95 % da produção obtida por esse processo (GOMES, 2009). Ao fim do processo de cozimento da madeira tem-se, como subproduto, um sistema complexo de compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos em meio aquoso, denominado licor negro, cuja composição química varia em função dos reagentes empregados no processo (licor branco), das condições de cozimento e, principalmente, do tipo da madeira utilizada (VENTAKESH e NGUYEN, 1985).

De modo, geral, as unidades fábris de celulose mais modernas são autossuficientes em energia, e ainda geram excedente que são negociado com as concessionárias, sendo que só no ano de 2015 cerca de 11,9 milhoes de GJ foram comercializados para a rede pública. E essa energia vem quase que exclusivamente dos subprodutos de seus processos, principalmente do licor negro e resíduos florestais, participando com 62,5% e 17,3%, respectivamente, de toda energia produzida (FIGURA 56) (IBÁ, 2016).

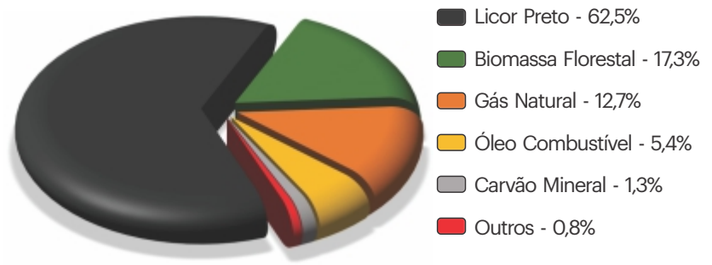


Figura 56 - Fontes de energia utilizadas pelo setor de celulose. Fonte: IBÁ, 2016

Resíduos Florestais Urbanos – Poda Urbana

Resídulos sólidos, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas são definidos como quaisquer resíduos que se apresentem nos estados sólido e semi-sólidos resultantes de atividades industrial, domiciliar, hospitalar, comercial, agrícola, e de serviços de varrição (ABNT, 2004). Outros autores consideram que estes resíduos compreendem, estritamente, os de origem residencial, comercial, serviços de varrição, de feiras livres, de capinas e de poda (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Independente da abrangência da definição, no Brasil tem-se uma grande geração de resíduos sólidos no ambiente urbano, principalmente nas regiões metropolitanas e, de modo geral, na maioria das vezes não possuem destinação correta ou mesmo sustentável. Sendo assim, em 2010, foi aprovada a Lei 12.305 que Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece destinação ambientalmente adequada de resíduos incluindo a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde, à segurança e minimizar os impactos ambientais adversos. Esta mesma lei estabelece que, poderão ser utilizadas tecnologias que visem a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada a viabilidade técnica e ambiental, contemplando a implantação de programa de monitoramente de emissão de gases tóxicos.

Um resíduo sólido urbano muito comum é o resultante da poda de árvores e outros vegetais que compõe a arborização dos municípios (FIGURA 57). Oriundo das atividades de manutenção das áreas verdes no ambiente urbano, e realizado tanto por prefeituras municipais quanto por concessionárias de energia elétrica, os resíduos de poda de árvores são compostos por galhos, folhas, raízes e troncos podendo normalmente ser obtidos ao longo de todo o ano. Apesar de alguns trabalhos feitos na tentativa de aproveitar estes resíduos, pesquisas apontam que este material vem sendo, em grande quantidade, descartados em aterros na maioria dos municípios (CENBIO, 2007).

Embora a classificação dos resíduos de poda de acordo com a NBR 10.004/2004 seja classe II, não perigoso, a disposição destes em aterros pode provocar uma série de problemas, pois podem interagir química e biologicamente com materiais preexistentes, causando impactos sobre a qualidade do solo, água e ar (CORTEZ, 2008).

Além dos fatores ambientais e econômicos que envolvem a utilização ou a disposição final dos resíduos, a Lei 12.305 estabelece que compete ao gerador a responsabilidade pelos resíduos sólidos gerados, compreendendo as etapas de acondicionamento, disponibilização para coleta, coleta, tratamento e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos.

Figura 57 – Poda Urbana. Fonte: Cemig (2011)

Dentro desse contexto, é crescente a busca por processos que transformem resíduos em subprodutos, sendo esses alavancados e potencializados pelas empresas, centros de pesquisas e os gestores municipais. O principal foco dessa questão é evitar a deposição em aterros sanitários e ao mesmo tempo proporcionar ao material, novas utilizações, por conseguinte valoração econômica e adequações ambientais (JURAS, 2001).

Ressalta-se, também, o desafio da convivência entre as redes de distribuição de energia elétrica e a arborização urbana devido a necessidade da manutenção das redes de energia concomitantemente com a existência da vegetação, a qual é necessária por questões ambientais e paisagísticas. Assim, a poda das árvores no ambiente urbano é uma atividade constante e que demanda mão de obra efetiva e técnica das prefeituras e também soluções para a disposição correta de todo o volume gerado, Souza (2014).

Além disso, presume-se que o resíduo de poda é um material muito heterogêneo, pois é oriundo de diversas espécies usadas na arborização urbana.

Existem várias rotas para aproveitamento dos resíduos de poda para energia, porém devido principalmente a heterogeneidade e a baixa densidade destes, a briquetagem e a pelletização são, atualmente, uma das alternativas mais viáveis técnica e economicamente para transformá-los em combustíveis com alta densidade energética e competitivo perante outras fontes. Além disso, pode-se utilizar os resíduos de podas urbana conjuntamente com outros resíduos para melhor destinação dos mesmos, conforme pode ser observado na pesquisa de Souza (2014), que produziu e qualificou pellets com resíduos de poda urbana e lodo de flotação, obtendo resultados satisfatórios (FIGURA 58).

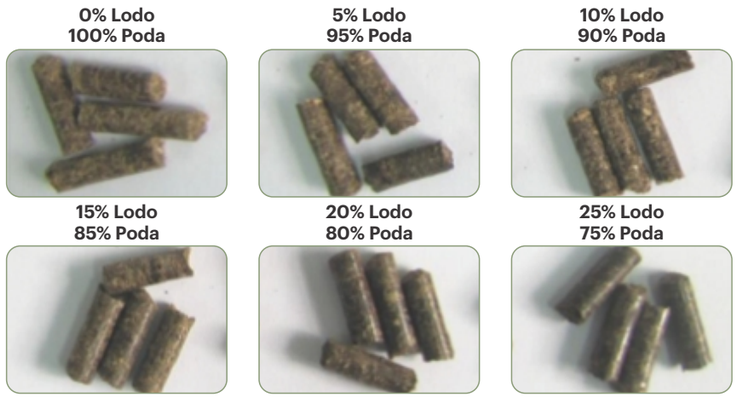


Figura 58 – Pellets produzidos com diferentes misturas de resíduos de poda urbana e lodo de flotação. Fonte: Souza, 2014.

De acordo com Gentil (2008), os produtos compactados produzidos a partir de diferentes biomassas residuais vêm se destacando no mercado, principalmente pelo apelo ambiental, e também pelo custo competitivo perante as fontes fósseis de energia. Segundo Karamazovi (2011) os produtos compactados além de servirem para gerar energia térmica e elétrica para as indústrias, também são utilizados em restaurantes, pizzarias, padarias, olarias, lareiras, dentre outros. Paula (2010) corroborando diz que toda empresa que possuir um forno ou uma caldeira na qual possa ser utilizada lenha, é um cliente potencial para usar briquetes e pellets.

3.6 - Resíduos sólidos urbanos

A Lei 12.305/10 que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos define resíduos sólidos como: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ainda de acordo com a Lei 12.305/10, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são classificados em resíduos domiciliares, originários de atividades domésticas em residências urbanas e resíduos de limpeza urbana, originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, bem como de outros serviços.

Caracterização

A produção de RSU e a característica destes é diretamente influenciada pelo tamanho da população, por seus hábitos, condições socioeconômicas, bem como as atividades exercidas por esta população. A composição média (%) dos resíduos no Brasil é ilustrada na Figura 59. A composição gravimétrica traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de resíduo analisada. É bastante variada, sendo, porém, a maior porcentagem de sua composição correspondente a resíduos orgânicos, variando de 50% a 60%. Esta composição pode variar de região para região, frente aos fatores intervenientes na sua geração, mencionados anteriormente.

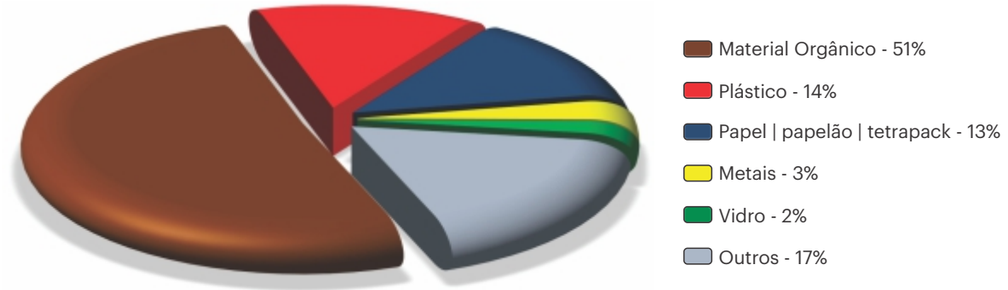


Figura 59 - Composição média dos RSU gerados no Brasil. - Fonte: ABRELPE (2013).

Com o passar dos anos, a disposição dos RSU em aterros sanitários vem aumentando. Esses aterros são considerados projetos de engenharia e a forma mais econômica de disposição ambiental segura dos RSU (ARCADIS, 2010). De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, essa tipologia de disposição é considerada ambientalmente adequada para rejeitos, pois há técnicas que visam a proteção do meio ambiente, contra a percolação de chorume, evitando a contaminação do solo e do lençol freático. No entanto, em muitas localidades, os resíduos sólidos ainda são dispostos em aterros controlados e lixões.

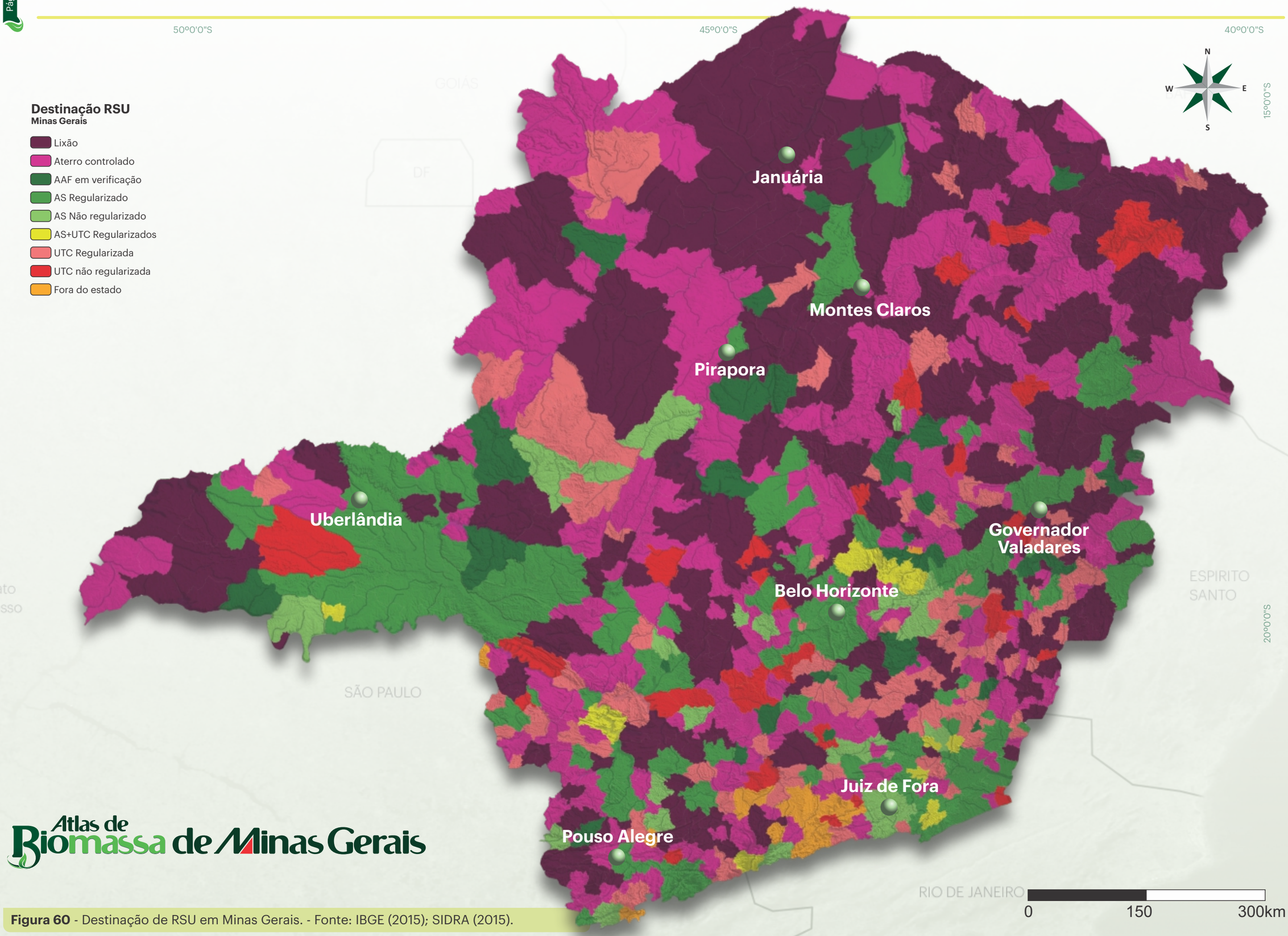
De acordo com dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública (ABRELPE, 2016), no ano de 2015, 58,7% dos RSU no Brasil foram destinados para aterros sanitários, o que correspondeu a quase 30 milhões de toneladas de resíduos dispostas em lixões ou aterros controlados. Esse tipo de destinação ainda é uma realidade presente na maior parte dos municípios brasileiros, aproximadamente 60% destes realizam o descarte de forma incorreta, causando prejuízo ambiental, pois tais modelos não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente. Em Minas Gerais, o número de municípios que destina os RSU para lixões vem diminuindo nos últimos anos, como pode ser observado na Tabela 13.

Ano	Número de Municípios	% de Municípios
2001	823	96%
2005	564	66%
2012	267	31%
2014	258	30%

Tabela 13 – Destinação dos resíduos sólidos em lixões em Minas Gerais, de 2001 a 2014.
Fonte: FEAM (2015).

A Figura 60 apresenta a destinação dos RSU em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, de acordo com dados de 2013, para os municípios de Minas Gerais.

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2016), em Minas Gerais somente 79 cidades possuem aterro sanitário como forma de disposição dos RSU gerados. Dessas 79, apenas 5 possuem aproveitamento dos gases drenados.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 60 - Destinação de RSU em Minas Gerais. - Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015).

Fontes de Biomassa

Produção

No Brasil são produzidos diariamente 195 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos (GOVERNO DE SÃO PAULO, 2016). Do total de resíduos gerados, cerca de 90,8% são coletados, o que equivale a aproximadamente 72,5 milhões de toneladas no ano de 2015 (ABRELPE, 2016). De acordo com ABRELPE (2016), em 2015 a região Sudeste concentrou cerca de metade dos resíduos gerados no país. As regiões Sudeste e Sul apresentam uma maior porcentagem de resíduos depositados em aterros sanitários (73 e 71%, respectivamente) em comparação com as outras regiões, enquanto a região Norte conta com o maior índice de destinação em lixões (34,3%). Na Figura 61 é apresentada a evolução da produção anual de RSU no Brasil.

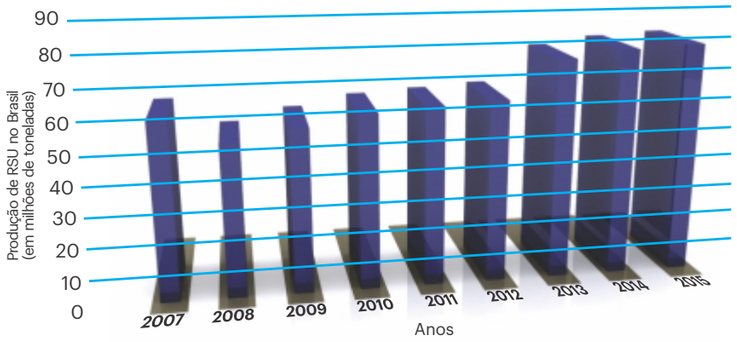


Figura 61 - Histórico da geração de RSU, em toneladas por ano, no País - Fonte: ABRELPE (2008 - 2016).

O Brasil, de acordo com dados do IBGE, possuía estimativa populacional em torno de 204 milhões de habitantes em 2015, e o estado de Minas Gerais, uma estimativa de, aproximadamente, 21 milhões de habitantes. Em 2015 foi registrada uma geração de aproximadamente 79,9 milhões de toneladas no país, configurando um crescimento a um índice inferior ao registrado em ano anterior. Para o ano de 2014 em relação a 2013, por exemplo esse aumento na geração de RSU foi de 2,9%. A geração per capita diária em massa de RSU em 2015 foi de 218,87 ton/dia, 1,7% superior a 2014 (ABRELPE, 2016). Esse aumento na geração de resíduos foi superior ao crescimento da população de 0,8%. Uma das possíveis causas para tal aumento pode ser a elevação da renda per capita, gerando assim uma maior propensão marginal a consumir e assim, uma maior produção de resíduos (NEVES e CROCOMO, 2005). Na Tabela 14 é apresentada a produção de RSU no Brasil para cada estado e região, no ano de 2015.

Regiões	Estados e Distrito Federal	População 2015	RSU Gerado (ton/dia)	RSU Coletado (kg/hab/dia)	RSU Coletado (ton/dia)
Norte	Acre	803.513	613	0,636	511
	Amapá	766.679	681	0,805	617
	Amazonas	3.938.336	4.264	0,944	3.716
	Pará	8.175.113	7.067	0,657	5.375
	Rondônia	1.768.204	1.461	0,633	1.120
	Roraima	505.665	408	0,674	341
	Tocantins	1.515.126	1.251	0,668	1.012
Nordeste	Alagoas	3.340.932	3.149	0,760	2.538
	Bahia	15.203.934	14.921	0,795	12.083
	Ceará	8.904.459	9.809	0,862	7.678
	Maranhão	6.904.241	7.296	0,629	4.340
	Paraíba	3.972.202	3.551	0,766	3.042
	Pernambuco	9.345.173	8.986	0,829	7.745
	Piauí	3.204.082	3.262	0,665	2.132
	Rio Grande do Norte	3.442.175	3.049	0,783	2.695
	Sergipe	2.242.937	1.839	0,732	1.641
Centro-oeste	Distrito Federal	2.914.830	4.653	1,565	4.561
	Goiás	6.610.681	6.790	0,975	6.447
	Mato Grosso	3.265.486	3.221	0,857	2.797
	Mato Grosso do Sul	2.651.235	2.642	0,910	2.412
Sudeste	Espírito Santo	3.929.911	3.363	0,789	3.101
	Minas Gerais	**20.869.101**	**19.214**	**0,838**	**17.479**
	Rio de Janeiro	16.550.024	22.213	1,323	21.895
	São Paulo	44.369.484	62.585	1,400	62.156
Sul	Paraná	11.163.018	8.858	0,748	8.345
	Rio Grande do Sul	11.247.972	8.738	0,731	8.224
	Santa Catarina	6.819.190	4.990	0,696	4.747

Tabela 14 - Produção de RSU nos Estados e no Distrito Federal, com destaque para Minas Gerais. - Fonte: ABRELPE (2016).

Nas cidades brasileiras a quantidade média de geração de resíduos domiciliares por pessoa pode variar de acordo com os fatores que influenciam suas características. No entanto, pode-se avaliar a geração média de resíduos sólidos urbanos de acordo com o tamanho da cidade, como verifica-se na Tabela 15. A geração per capita relaciona a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerada diariamente e o número de habitantes de determinada região.

Tamanho da cidade	População urbana (hab.)	Geração per capita (kg/hab. dia)
Pequena	Até 30 mil	0,5
Média	30 mil a 500 mil	0,50 a 0,80
Grande	500 mil a 5 milhões	0,80 a 1,00
Megalópole	> 5 milhões	>1,00

Tabela 15 - Geração média per capita de RSU no Brasil. Fonte: Monteiro et al. (2001).

A Figura 62 apresenta o histórico da produção de RSU no estado de Minas Gerais.

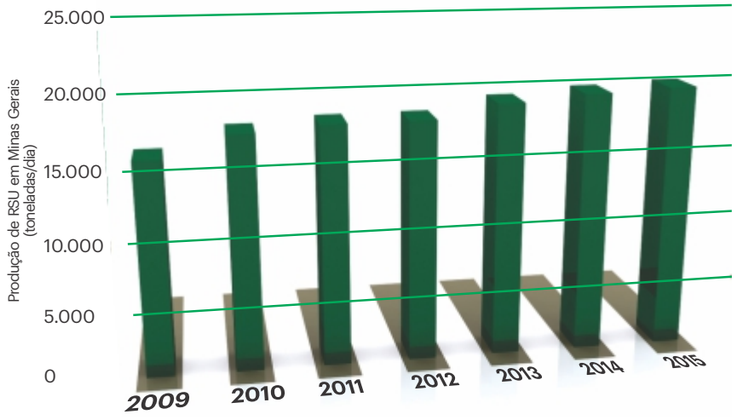


Figura 62 - Histórico da produção de RSU em Minas Gerais. Fonte: ABRELPE (2010-2016)

3.7 - Resíduos do tratamento de esgoto

O Ministério do Meio Ambiente, por meio da resolução CONAMA nº 375 de 2006, define o lodo como o resíduo líquido ou sólido oriundo do tratamento de esgotos cuja composição predominantemente orgânica varia em função de sua origem. Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água. A fração restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. É essa fração de 0,1% que vem a formar após o tratamento do esgoto, o lodo. Ainda que o lodo possa, na maior parte das etapas do seu manuseio, ser constituído de mais de 95% de água, por convenção é designado como resíduo sólido (von SPERLING, 2005).

No Brasil, de acordo com dados disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), até o ano de 2014, 55% do esgoto produzido foi coletado, e desse volume, 71% recebeu algum tipo de tratamento. Na Tabela 16 são apresentados os percentuais de esgoto coletado e tratado em cada uma das regiões do país. Na Figura 63, esse índice é apresentado por estados. O percentual de tratamento é relativo ao total de esgoto coletado.

Região	% esgoto coletado	% esgoto tratado
Norte	16,1	78,2
Nordeste	35,7	78,5
Centro-oeste	50,7	91,1
Sul	42,7	84,1
Sudeste	67,0	65,4
Total	**54,9**	**70,9**

Tabela 16 - Percentual de esgoto coletado e tratado nas regiões do Brasil. - Fonte: SNIS (2016).

O gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é uma atividade complexa, que se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados destes sistemas (LUDUVICE, 2001). Além disso, as dificuldades no gerenciamento do lodo em ETEs, que representam uma porcentagem reduzida do volume total de esgoto tratado, também se relacionam aos custos operacionais, que podem chegar a 50% do total (SPINOSA et al., 2011). No Brasil, a principal alternativa para o destino do lodo é o aterro sanitário, o que resulta em elevados gastos com transporte e desperdício do seu potencial energético (ROSA et al., 2014).

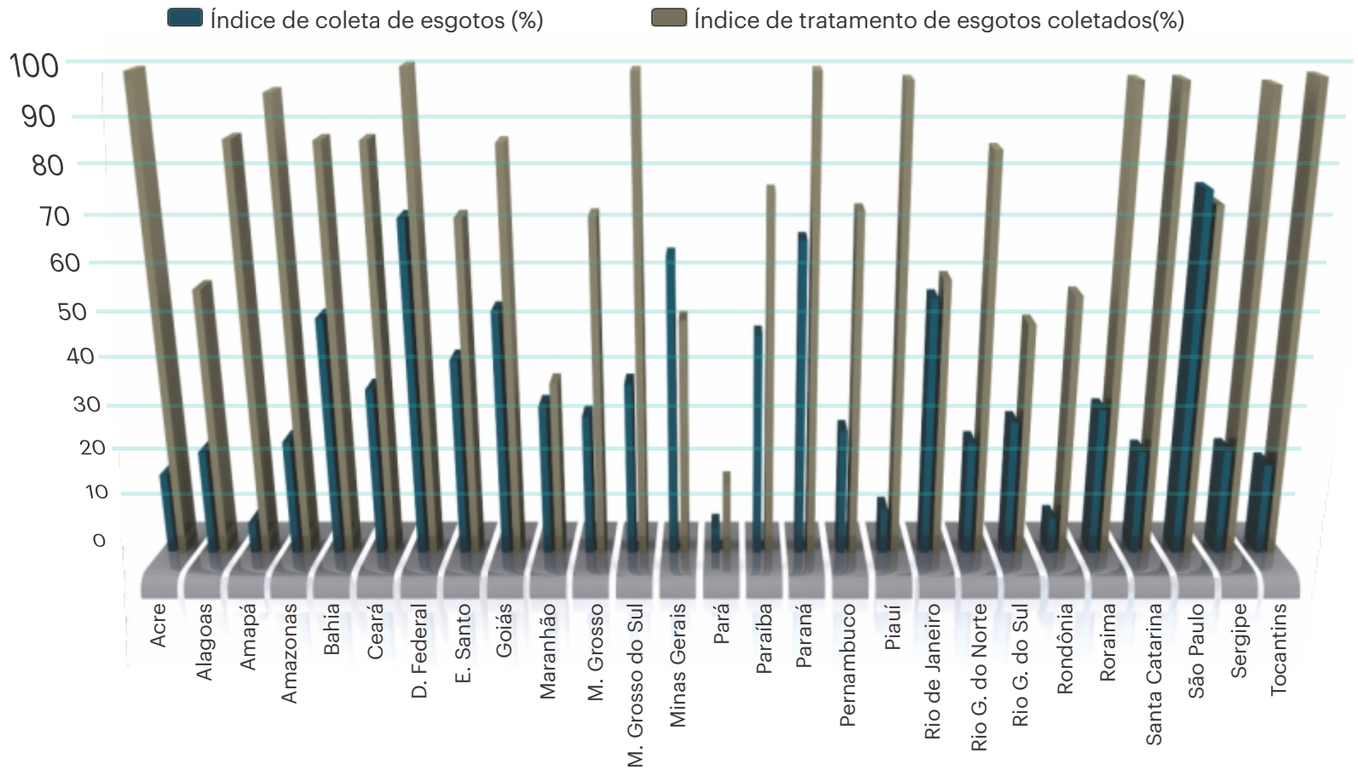


Figura 63 - Índice de coleta e tratamento de esgoto por Estado. - Fonte: SNIS (2016).

Caracterização

De acordo com von Sperling (2005), de maneira geral, os subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgoto são os seguintes: material gradeado, areia, escuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico (caso haja etapa físico-química). Os lodos primário e secundário são os mais importantes em termos de quantidade de geração, constituindo grande parte dos resíduos de uma ETE para tratamento e disposição final. Esses lodos são compostos de sólidos sedimentáveis (lodo primário) e de biomassa microbiana, constituída de matéria orgânica absorvida e convertida (lodo secundário ou biológico). A produção de lodo é função precípua do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida. A Tabela 17 apresenta as características e quantidade do lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgotos.

Sistema	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.dia)	Volume de lodo (L/hab.dia)
Tratamento primário (convencional)	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Lagoa facultativa	0,12-0,32	5-15	12-32	0,1-0,25
Lagoa aerada facultativa	0,08-0,13	6-10	8-13	0,08-0,22
Lodos ativados convencional	0,60-0,80	1-2	60-80	3,1-8,2
Reator UASB*	0,12-0,18	3-6	12-18	0,2-0,6
UASB*+pós-tratamento aeróbio	0,2-0,32	3-4	20-32	0,5-1,1

* Reator anaeróbio de manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*); SS = sólidos secos; DQO = demanda química de oxigênio; hab= habitantes. Fonte: von Sperling e Gonçalves (2001).

Tabela 17 - Percentual de esgoto coletado e tratado nas regiões do Brasil. - Fonte: SNIS (2016).

Fontes de Biomassa

Como mencionado anteriormente, em um sistema de tratamento podem ser encontrados lodos primários e secundários, sendo os últimos também denominados como biológicos. O primeiro possui em sua constituição basicamente sólidos sedimentáveis presentes no efluente. O segundo, em contrapartida, possui teor mais elevado de matéria orgânica. É nesta etapa do tratamento da fase liquida dos esgotos que ocorre a remoção dessa matéria orgânica por microrganismos. Os lodos oriundos do tratamento biológico podem por sua vez serem subdivididos em aeróbios e anaeróbios, de acordo com o tratamento empregado.

O tratamento de esgotos por processos biológicos resulta em dois tipos de resíduos: o efluente líquido pronto para ser devolvido ao meio ambiente e o lodo secundário, que é um material pastoso com grande concentração de microrganismos, sólidos orgânicos e minerais. Apesar do lodo biológico ser o resíduo produzido em maior quantidade em uma ETE, outros tipos de sólidos são retidos em diferentes operações nas estações de tratamento de esgotos (PEDROZA et al., 2010), conforme é apresentado na Tabela 18.

Subproduto sólido gerado	Origem do resíduo na ETE;
Sólidos Grosseiros	Grade;
Areia	Desarenador;
Escuma	Desarenador, decantador primário, decantador secundário, reator anaeróbio e lagoa de estabilização;
Lodo Primário	Tanque séptico e decantador primário;
Lodo Biológico Aeróbio (Não Estabilizado)	Lodos ativados convencional e reatores aeróbios com biofilme (Alta carga);
Lodo Biológico Aeróbio (Estabilizado)	Lodos ativados – aeração prolongada e reatores aeróbios com Biofilme (baixa carga);
Lodo Biológico Anaeróbio (Estabilizado)	Lagoas de estabilização, reatores UASB e filtros anaeróbios;
Lodo Químico	Decantador primário com precipitação química e lodos ativados com precipitação de fósforo.

Tabela 18 - Origem dos principais subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos. - Fonte: Andreoli et al. (2001); Metcalf e Eddy, (2002).

Na Tabela 19 são apresentados os períodos de remoção empregados em diferentes sistemas de tratamento de esgotos.

Sistema	Intervalo de remoção do lodo	
	Lodo primário	Lodo secundário
Tratamento primário (convencional)	Horas	-
Lagoas (em geral)	-	Anos
Reator UASB	-	Semanas
Reator UASB + pós tratamento	-	Semanas
Lodos ativados convencional	Horas	Aprox. contínuo
Aeração prolongada	-	Aprox. contínuo
Filtro biológico de baixa carga	Horas	Horas
Filtro biológico de alta carga	Horas	Horas

Tabela 19 - Intervalo de remoção do lodo em diferentes sistemas de tratamento de efluentes. - Fonte: Adaptado de Andreoli et al. (2007).

A produção de lodo depende, em cada tipo de tratamento de esgoto, do tempo de descarte do mesmo, que varia conforme o tratamento e influencia no volume final gerado. De acordo com von Sperling (2005), o período de armazenamento tem grande influência nas características do lodo e, por conseguinte, na forma de tratamento. Lodos retirados em intervalos de semanas, meses ou anos usualmente são já digeridos e também mais adensados, o que vai interferir diretamente nos processos de obtenção de energia.

Produção

A produção de esgoto doméstico no Brasil situa-se entre 80 a 200 litros/hab.dia sendo que, cada habitante produz cerca de 150 g/dia de lodo centrifugado (ALEM SOBRINHO, 2001). Pedroza et al (2010) estimam que a produção de lodo no Brasil está entre 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano. O tratamento da fase sólida de uma ETE aeróbia representa, aproximadamente, 50% dos custos de operação, no tratamento de efluentes (KHIARI et al., 2004).

A utilização do lodo de ETE para geração de energia pode contribuir para a redução desses custos, sobretudo a partir do aproveitamento dessa energia no próprio processo de tratamento. Benefícios indiretos também devem ser considerados na avaliação da viabilidade técnica e econômica do processo. O aproveitamento energético do lodo reduz o volume de material disposto nos aterros sanitários, o que representa elevação na perspectiva de vida útil do aterro. Considerando-se isoladamente o processo de geração de energia e o investimento para a implantação da infraestrutura necessária, salienta-se que a matéria prima a ser utilizada trata-se de um resíduo de um processo anterior, nesse caso, o tratamento do esgoto, não possuindo, portanto, custos adicionais.

A Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa) já conta com uma termelétrica de cogeração de energia em fase pré-operacional funcionando na Estação de Tratamento de Esgoto Arrudas. Ela ocupa 63,84 hectares e opera, inicialmente, para 1 milhão de habitantes. O lodo e a escuma provenientes das elevatórias de lodo e escuma primários são encaminhados para unidades de digestão anaeróbia, onde ocorrem a estabilização da matéria orgânica e a redução dos sólidos voláteis. Parte da matéria orgânica é convertida em gás pela fermentação anaeróbia e transformação dos ácidos orgânicos. O lodo digerido é encaminhado a um tanque aberto, denominado digestor secundário, onde ocorre a separação lodo/líquido. O biogás gerado será aproveitado através do sistema de co-geração de energia elétrica, que é composto de basicamente de armazenamento do biogás, tratamento e condução do gás tratado para três conjuntos de quatro microturbinas de 200 kW cada, perfazendo uma instalação total de 2,4 MW de potência instalada. A energia elétrica gerada nessa pequena central termelétrica será utilizada integralmente na própria planta, devendo gerar uma potência firme capaz de suprir cerca de 90% da necessidade da estação. O calor dos gases de exaustão das microturbinas será conduzido para trocadores de calor gás – água e água – lodo, de modo a aquecer o lodo proveniente dos biodigestores, num circuito fechado, aumentando a temperatura média no interior dos mesmos, otimizando a digestão e aumentando a produção do biogás que alimenta as microturbinas (COPASA, 2012). Em 2012 a produção era de cerca de 800 kg/h e previsão é de quando as turbinas estiverem funcionando plenamente, a economia no consumo de energia elétrica da planta chegará a 90% e as contas da empresa terão uma redução de R$ 2,7 milhões por ano (IBAHIA, 2012).

Um dos países que mais utiliza a tecnologia é a Alemanha, onde cerca de 800 estações possuem digestão anaeróbia de lodo e geração de eletricidade a partir do biogás, totalizando em 2008 uma geração de pouco mais de 1 TWh. Nos Estados Unidos, 104 estações com 190 MW de capacidade instalada utilizam biogás oriundo dos digestores de lodo como fonte primária de combustível. Na cidade de Didcot, no Reino Unido, uma estação especial de tratamento transforma dejetos humanos lançados pela descarga em energia oriunda do gás metano para consumo doméstico (IBAHIA, 2012).

3.8 - Efluentes Líquidos Animais

O Brasil ocupa posição de destaque na produção pecuária, sendo importante fornecedor de proteína animal para a população mundial. A pecuária brasileira experimentou importantes ganhos de produtividade, abrangendo os segmentos de bovinocultura, avicultura e suinocultura, com aumento da produção de carnes de 46% no período de 2003 a 2013, atingindo 25,7 milhões de toneladas nesse último ano (MAPA, 2014).

A produção pecuária nacional exerce grande impacto nas exportações brasileiras, além de abastecer o mercado interno. O país possui significativa variedade de rebanhos conforme apresentado na Tabela 20.

Efetivo dos rebanhos (Cabeças)						
Tipo de Rebanho	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**
Bovino	209.541.109	212.815.311	211.279.082	211.764.292	212.366.132	215.199.488
Bubalino	1.184.511	1.278.075	1.261.922	1.332.284	1.319.478	1.365.636
Equino	5.514.253	5.510.601	5.363.185	5.312.076	5.450.601	5.551.238
Suíno - total	38.956.758	39.307.336	38.795.902	36.743.593	37.930.307	40.332.553
Suíno - matrizes de suínos	-	-	-	4.615.201	4.753.248	4.826.495
Caprino	9.312.784	9.386.316	8.646.463	8.779.213	8.851.879	9.614.722
Ovino	17.380.581	17.668.063	16.789.492	17.290.519	17.614.454	18.410.551
Galináceos - total	1.238.912.537	1.268.209.405	1.245.269.485	1.246.637.953	1.320.749.401	1.332.078.050
Galináceos - galinhas	210.761.060	216.219.543	213.230.493	219.681.760	223.913.652	222.121.443
Codornas	12.992.269	15.567.634	16.436.164	18.171.955	20.332.003	21.986.842

Tabela 20 - Efetivo de rebanhos no Brasil entre os anos de 2010 e 2015. - Fonte: IBGE/PPM (2015).

A Figura 64 apresenta os quantitativos da participação do país na produção (FIGURA 64a) e na exportação (FIGURA 64b) das carnes bovina, suína e de frango no ano de 2016.

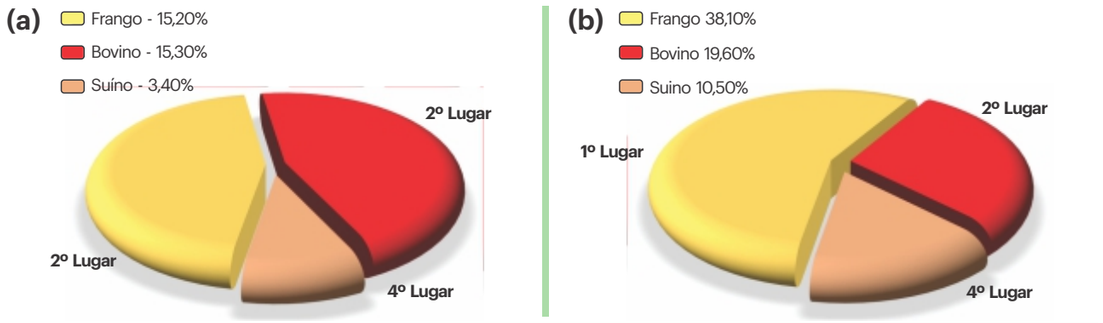


Figura 64 - Quantitativos da participação do país: a) na produção; b) na exportação das carnes bovina, suína e de frango em relação ao resto do mundo. Fonte: EMBRAPA (2017).

A produção animal intensiva pode ser considerada uma atividade de grande impacto ambiental negativo, devido a geração de grande quantidade de dejetos. Nesse contexto, a digestão anaeróbia surge como potencial alternativa para o tratamento desses dejetos, pois além de possibilitar a redução do potencial poluidor e dos riscos sanitários dos resíduos, promove a geração do biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia renovável e permite a reciclagem de nutrientes do efluente, podendo ser utilizado como biofertilizante (BLEY JÚNIOR et al., 2009).

Em princípio, todos os compostos orgânicos podem ser degradados pela via anaeróbia, sendo que o processo se mostra mais eficiente e mais econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis. A digestão anaeróbia é um processo frequentemente empregado na conversão de rejeitos em produtos de valor agregado e ocorre por meio de quatro reações principais:

I) hidrólise – polímeros orgânicos complexos são decompostos em monômeros como açúcares, ácidos orgânicos e aminoácidos por bactérias hidrolíticas;
II) acidogênese – monômeros orgânicos são convertidos em hidrogênio, bicarbonato, ácidos acético, propiônico e butírico e outros compostos orgânicos, tais como etanol e ácido lático por bactérias acidogênicas;
III) acetogênese – oxidação de compostos orgânicos reduzidos gerando acetato ou hidrogênio e dióxido de carbono por ação de bactérias acetogênicas;
IV) metanogênese – produção de metano por archaeas metanogênicas acetoclásticas e archaeas metanogênicas hidrogenotróficas.

Na Figura 65 é apresentado o esquema dos processos que compõem a digestão anaeróbia.

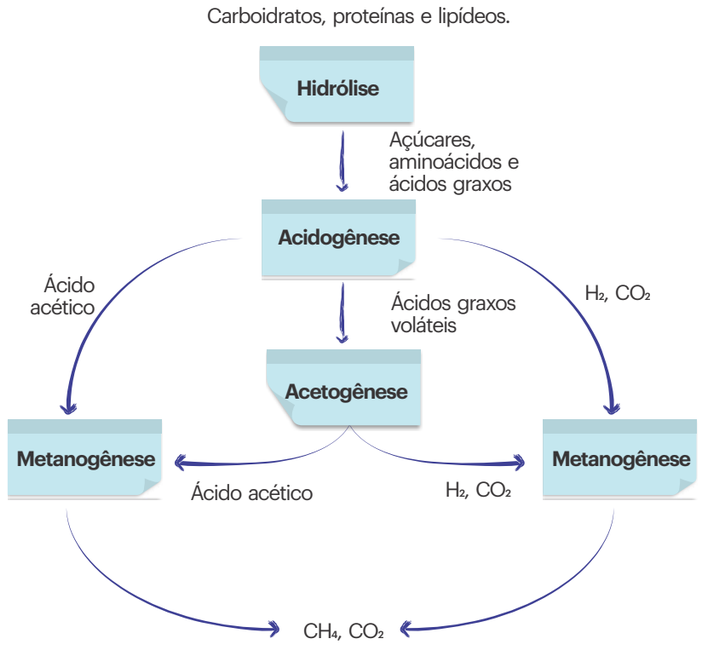


Figura 65 - Degradação da matéria orgânica pela digestão anaeróbica. - Fonte: Adaptado de Li et al. (2011).

A conversão de matéria orgânica em biogás por meio da digestão anaeróbia produz essencialmente metano e dióxido de carbono, além de pequenas quantidades de outros gases, como sulfetos e gás hidrogênio.

Os digestores anaeróbios têm sido largamente aplicados para o tratamento de resíduos sólidos, incluindo culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de estações de tratamento de efluentes e resíduos sólidos urbanos, estimando-se que milhões de digestores anaeróbios tem sido construídos em todo mundo, com esse propósito (CHERNICHARO, 2007). Algumas vantagens do processo anaeróbio conferem aos reatores um grande potencial de aplicabilidade. Dentre elas, destacam-se: o baixo consumo de energia, baixos custos de operação e implantação, tolerância a elevadas cargas orgânicas e baixa produção de sólidos (CHERNICHARO, 2007).

Segundo Castanho e Arruda (2008), os tipos de biodigestores mais usados são os modelos canadense, chinês e indiano. O biodigestor modelo Canadense (FIGURA 66) é um modelo tipo horizontal, apresentando

uma caixa de carga em alvenaria que possui largura maior que a profundidade, o que permite uma grande exposição ao sol e maior produção de biogás, devido à elevação da temperatura. Durante a produção de gás, a cúpula do biodigestor infla, pois é feita de material plástico maleável (PVC). O alto custo da cúpula inflável pode ser considerado como a principal desvantagem desse tipo de biodigestor.

Figura 66 - Biodigestores do tipo canadense. Foto - Unidades de Captação de Biogás. Divulgação/Eletrosul. | www.wp.clicrbs.com.br

O biodigestor modelo Chinês (FIGURA 67) foi desenvolvido voltado para as pequenas propriedades rurais. É constituído de um modelo de peça única, construído em alvenaria e enterrado no solo para ocupar menos espaço (CASTANHO e ARRUDA, 2008). Esse tipo de reator dispensa o uso de gasômetro em chapa de aço, reduzindo assim os custos de implantação. No entanto, problemas com vazamento do biogás caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada podem ocorrer (DEGANUTTI et al., 2002).

O modelo de biodigestor indiano (FIGURA 68) caracteriza-se por possuir uma campânula móvel como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em digestão, ou em um selo d'água externo, e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. A função da parede divisória faz com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação. Possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando o volume deste (DEGANUTTI et al., 2002).

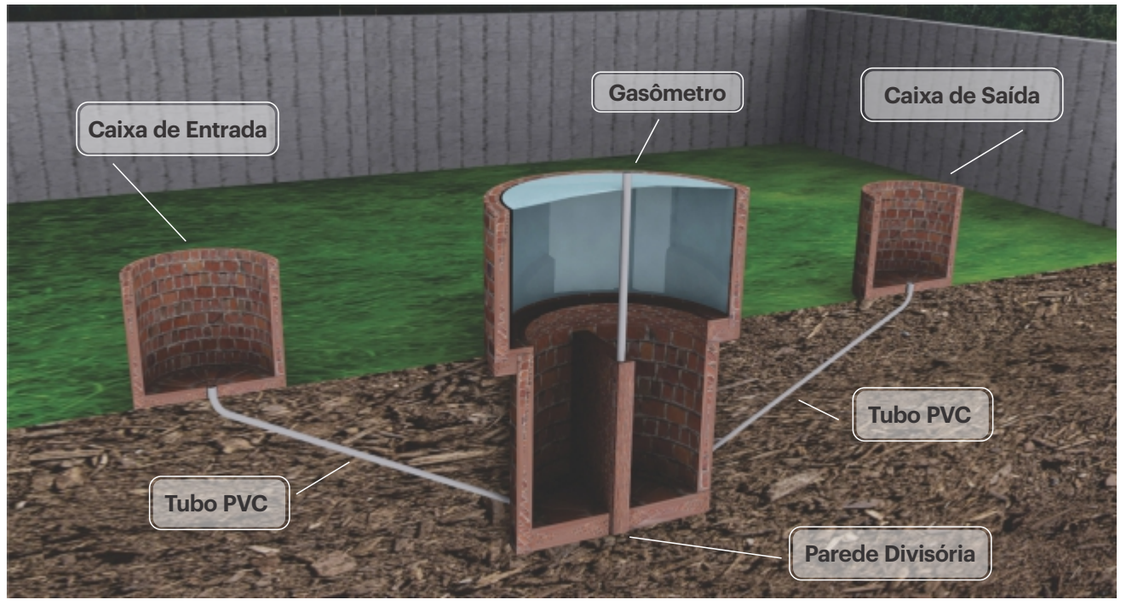


Figura 68 - Biodigestor do tipo indiano: (a) Representação tridimensional em corte; (b) vista lateral.

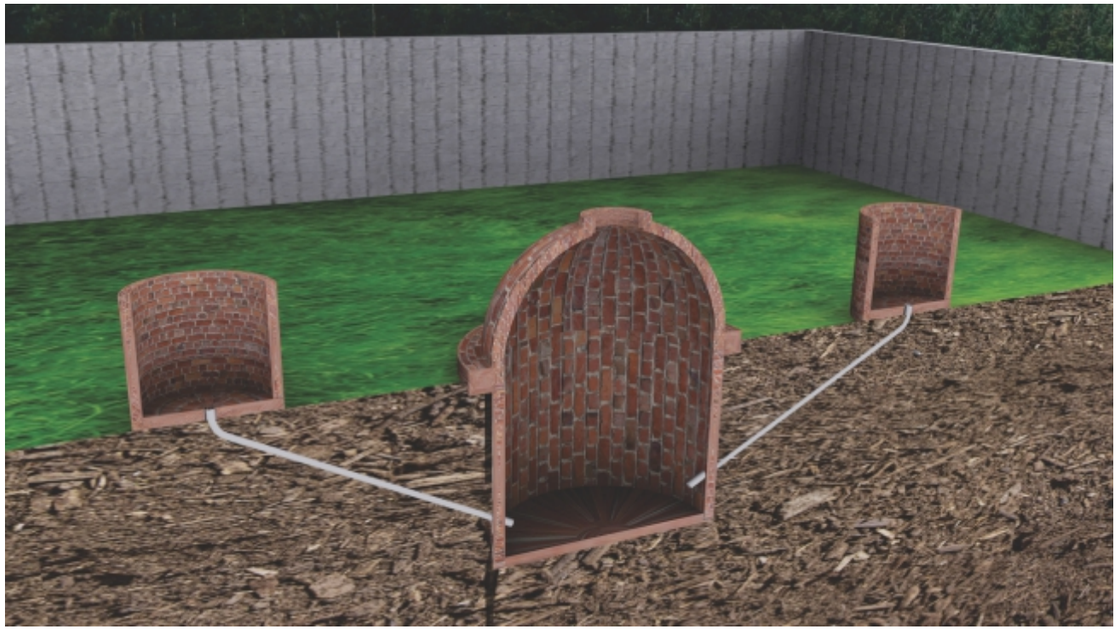


Figura 67 -Biodigestor do tipo chinês: (a) Representação tridimensional em corte; (b) vista lateral.

Resíduos da produção de aves

O Brasil ficou em 2º lugar no ranking mundial de produção de frango de corte, com 12,9 milhões de toneladas em 2016, sendo 4,38 milhões destinadas à exportação. O consumo per capita de carne de frango no país nesse mesmo ano foi de 41,1 kg (ABPA, 2016).

Dados da pesquisa trimestral de abate de animais do IBGE (IBGE, 2017) revelaram um número recorde de abate de frango em 2016 com 5,86 bilhões de cabeças, refletindo um aumento de 1,1 % em relação ao ano anterior. Minas Gerais se apresentava no ano de 2015 como o quinto maior estado em termos de abate da ave no Brasil, com 7,25% de todo o país, com rebanho de 124.929.454 de cabeças de galináceos. No mesmo ano, o Paraná, além da primeira colocação no abate de frango, também foi o estado com a maior quantidade exportada no Brasil, sendo 35,7% do total, enquanto Minas Gerais representou cerca de 4,67% das exportações do país (ABPA, 2016). A Figura 69 apresenta o ranking dos estados brasileiros para o efetivo dos rebanhos (cabeças) de galináceos total.

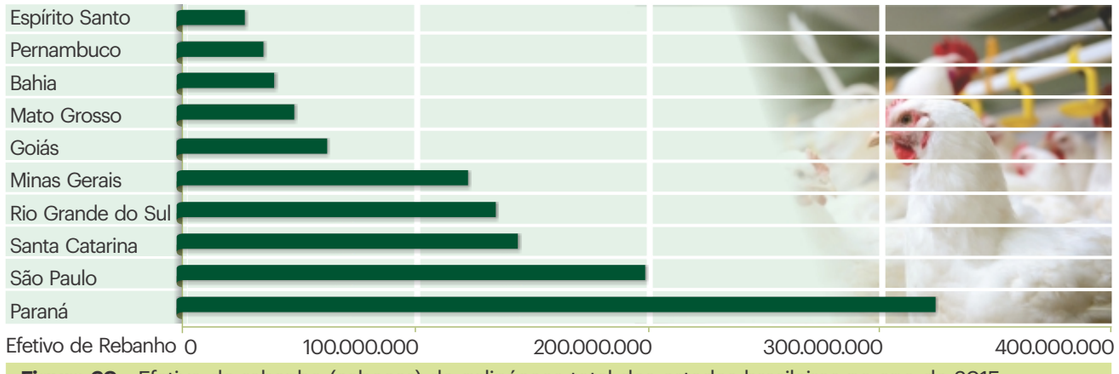


Figura 69 - Efetivo do rebanho (cabeças) de galináceos total dos estados brasileiros no ano de 2015. Fonte IBGE/PPM (2015)

A Tabela 21 apresenta o efetivo do rebanho de galináceos dos 10 municípios do estado de Minas Gerais com maior rebanho no ano de 2015. Os municípios de Uberlândia, São Sebastião do Oeste e Pará de Minas se destacam positivamente, com um rebanho superior a 9 milhões de cabeças.

Município de Minas Gerais	Efetivo de rebanho (cabeças)
Uberlândia	14.922.260
São Sebastião do Oeste	10.154.428
Pará de Minas	9.571.995
Uberaba	5.553.200
Itanhandu	5.447.891
São José da Varginha	5.416.250
Montes Claros	2.722.788
Igaratinga	2.379.000
Monte Alegre de Minas	2.339.889
Barbacena	2.265.500

Tabela 21 - Efetivo do rebanho de galináceos dos 10 municípios do estado de Minas Gerais com maior rebanho no ano de 2015. - Fonte: IBGE/PPM (2015).

Os resíduos mais significantes gerados no setor de avicultura (principalmente no processo de abate para a produção de carne de frango) que não são aproveitados para o consumo humano ou para a sua comercialização são: vísceras, penas, sangue, cabeças, peles, gorduras, ossos e carcaças (SCHNEIDER et al., 2012). Além desses resíduos está a cama de frango, como é chamada a composição de dejetos de frango com o material suporte usado nos aviários.

A geração de resíduos para cada quilo de frango de corte é de aproximadamente 0,085 kg (SCHNEIDER et al., 2012). Na Tabela 22 são apresentadas as quantidades de resíduos sólidos gerados diariamente em um abatedouro de frangos, discriminada por tipo de dejeto.

Tipo de resíduo	Quantidade (kg/unidade de ave)
Penas	0,112
Vísceras cruas	0,158
Cabeças	0,042
Pés	0,009
Peles	0,009
Gorduras	0,002
Ossos	0,036
Resíduos de cama de aviário	0,006
Restos de carcaças (resíduos)	0,110
Borra do flotador	0,055
Sangue	0,085 (L/unidade de ave)
Efluente líquido	0,015 (m^3/unidade de ave)

Tabela 22 - Quantidade de resíduos sólidos gerados na produção diária de um abatedouro de frangos. Fonte: Adaptado de Schneider et al. (2012) e Padilha et al. (2005).

Com base no aproveitamento dos resíduos para a produção de novos produtos, Schneider et al. (2012) afirmam que do total de resíduos gerados em abatedouros de aves, os que possuem maior potencial para serem utilizados na produção de biogás e posterior conversão em energia são os resíduos da cama aviária, a borra do flotador e o efluente líquido.

Resíduos da produção de bovinos

Nos últimos anos o Brasil tem se destacado como um importante produtor e exportador mundial de carne bovina. O Produto Interno Bruto (PIB) da pecuária bovina de corte é o maior entre as cinco cadeias produtivas do agronegócio brasileiro (CANAL RURAL, 2016). Em relação ao rebanho leiteiro, a produção está entre as seis mais importantes da agropecuária brasileira ficando à frente do café beneficiado e arroz, sendo que para cada dólar de aumento na produção do leite, aumenta-se cinco dólares no PIB (BB, 2010).

O sistema de criação de bovinos comumente utilizado no Brasil é a pecuária extensiva com o rebanho criado solto no pasto e alimentado à base de capim. Os sistemas de confinamento, com o rebanho criado à base de ração e em pequenos espaços, correspondem a 10% do total (BRADESCO, 2017).

O clima e a extensão territorial do país permitem o desenvolvimento da bovinocultura, além de proporcionar lucratividade na cadeia produtiva da carne e do leite, favorecida também pelos investimentos em tecnologia, capacitação profissional, desenvolvimento de políticas públicas que influenciam todo o processo, controle da sanidade animal e segurança alimentar (PROCREARE, 2017). Os maiores rebanhos bovinos estão presentes nas regiões Centro-Oeste (34,4%), Norte (19,7%) e Sudeste (18,5%).

O inadequado manejo dos dejetos bovinos pode contribuir com a poluição das águas (subterrâneas e superficiais), do ar (pelo lançamento de gases com elevado potencial de intensificação do efeito estufa) e do solo. De acordo com Vieira et al. (1991), os ruminantes são os maiores produtores de dejetos, devido à qualidade e a natureza dos alimentos que ingerem.

Partindo de uma base técnica rudimentar, nos anos 70, a bovinocultura já representava uma das mais importantes atividades econômicas da agropecuária brasileira (BATISTELLA et al., 2011). Atualmente o Brasil possui o maior rebanho comercial de gado bovino do mundo, com aproximadamente 216 milhões de cabeças (IBGE, 2015), ocupando aproximadamente 20% do território nacional (BATISTELLA et al., 2011). Na bovinocultura de corte, 89% das criações são realizadas exclusivamente em pastagens (RESENDE e BITENCOURT, 2005). A produção leiteira em 2015 foi de 35.000.227 bilhões de litros, com 21.751.073 vacas ordenhadas, em 1,3 milhão de propriedades, distribuídas por 99% municípios brasileiros, o que coloca o Brasil em quarto lugar, no ranking mundial dos países produtores (ZOCCAL, 2016).

A Tabela 23 apresenta a distribuição do rebanho bovino por região. Minas Gerais se destaca na região Sudeste, em quantidade de rebanho, além de ser o estado detentor do maior rebanho ordenhado do país, sendo 5.423.676 de cabeças (IBGE, 2015).

Efetivo de rebanho bovino por região (2015)

Região	Rebanho
Centro-Oeste	72.705.736
Nordeste	29.092.184
Norte	47.154.969
Sudeste	38.812.076
Sul	27.434.523
Brasil	**215.199.488**

Tabela 23 - Distribuição do rebanho bovino por região brasileira. Fonte: IBGE/PPM (2015).

A Tabela 24 apresenta os municípios mineiros que se destacam em quantidade de rebanho.

Ranking mineiro do efetivo de rebanho bovino

Município	Quantidade de Rebanho
Prata	414.700
Campina Verde	371.200
Unaí	360.558
Paracatu	298.640
Carlos Chagas	283.130
Santa Vitória	283.000
João Pinheiro	241.084
Carneirinho	237.430
Patos de Minas	228.960
Uberlândia	217.560

Tabela 24 - Municípios com maior rebanho no Estado. Fonte: IBGE/PPM (2015).

A produção diária de fezes e urina equivale, aproximadamente, a 6% do peso do gado adulto (HADDAD, 1995), e pode atingir até 30 kg por dia. A Tabela 25 apresenta os nutrientes contidos nessas excretas. Junqueira (2011) ressalta que a quantidade de fezes excretada sofre influência de fatores como: peso, idade, nível de produção, estado fisiológico do animal, quantidade e qualidade do alimento fornecido aos animais, sistema de produção (pasto, confinamento ou semi-confinamento) e estação do ano. A autora ainda aponta que animais estabulados, que recebem diferentes níveis de alimentação, têm uma produção mais elevada de dejetos do que os animais mantidos em pasto.

Elemento	Urina	Fezes
N	76 a 82	18 a 24
K	70 a 90	13 a 30
P	Traços	95+
Mg	10 a 30	70 a 90
S	6 a 90	10 a 94
Ca	Traços	99

Tabela 25 - Forma de excreção dos nutrientes ingeridos (% do total excretado). Fonte: Wilkinson e Lowrey (1973).

A Tabela 26 apresenta a produção média de dejetos do rebanho bovino estratificado entre leite e corte.

	Gado de leite	Gado de corte
	Produção de dejeto (Kg de animal/dia)	Produção de dejeto (Kg de animal/dia)
Brasil	**316.909.675**	1.338.458.709
Norte	37.597.956	299.164.003
Nordeste	67.721.023	168.866.830
Sudeste	106.168.600	223.152.437
Sul	54.801.360	173.470.573
Centro-Oeste	50.620.735	501.383.633

Tabela 26 - Produção média de dejetos. - Fonte: (IPEA, 2012), adaptado.

O confinamento passou a ser visto como uma ferramenta estratégica para o pecuarista que deseja ganhar em escala no seu sistema de produção e agregar qualidade em seus produtos (JUNQUEIRA, 2011), embora ainda apresente custos elevados, principalmente por conta da alimentação. Caso este modelo vigore, ter-se-á o aumento da densidade populacional bem como da concentração dos resíduos gerados em pequenas áreas, agravando os problemas ambientais, já que na maioria das vezes, os resíduos gerados não recebem nenhum tipo de tratamento ou manejo (JUNQUEIRA, 2011). Estes dejetos, quando manejados e reciclados adequadamente, deixam de ser poluentes e passam a constituir valiosos insumos para um modelo de produção sustentável.

Fontes de Biomassa

Resíduos da produção de suínos

A suinocultura representa grande importância social e econômica para o país ocupando lugar de destaque no agronegócio brasileiro. O plantel reprodutivo brasileiro, segundo o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2016) é de 1.720.255 matrizes, tendo produzido 39.263.964 suínos para abate em 2015. Esse volume, quando se considera as diferentes etapas de produção e consumo, fez com que o Produto Interno Bruto (PIB) da suinocultura no Brasil somasse R$ 62,576 bilhões, ou US$ 18,745 bilhões, se considerado o câmbio de R$ 3,33 estabelecido pelo Banco Central do Brasil (BCB) no fechamento de 2015. Por sua vez, a movimentação de toda cadeia produtiva de suínos foi de R$ 149,867 bilhões (US$ 44,893 bilhões).

Do animal tem-se os mais diversos usos, desde a carne (principal produto) até aplicações farmacêuticas, medicinais, fertilizantes e também bioenergéticos.

Com o aumento da produção, surgiu um impasse para o setor: a destinação e o controle dos dejetos de suínos. O que era antes visto como um grande problema, passou a integrar soluções inteligentes para o aumento da renda dos produtores que investem em tecnologia. O aproveitamento dos resíduos orgânicos oriundos das suinoculturas tem aumentado devido ao interesse não somente pelos aspectos de reciclagem de nutrientes no próprio local e de saneamento, mas também pelo aproveitamento energético do biogás.

No Brasil a produção de suínos vem ganhando destaque nas últimas décadas, resultado dos investimentos em ampliações e também de uma considerável evolução na produtividade das granjas.

Segundo SEBRAE (2016), há variações com relação ao modelo produtivo, de acordo com a região do país. Enquanto no Sul há predomínio de pequenos suinocultores integrados ou cooperados, especializados em determinada fase da produção, a região sudeste é marcada por produtores independentes com produção de ciclo completo. Destacando que, cada sistema está adaptado ao seu mercado e todos vêm ganhando eficiência e competitividade mantendo um constante crescimento da produção nacional.

Com relação as exportações de carne suína, de acordo com a Figura 70, o país ocupa hoje a quarta posição, ficando atrás apenas da União Europeia, Estados Unidos e Canadá.

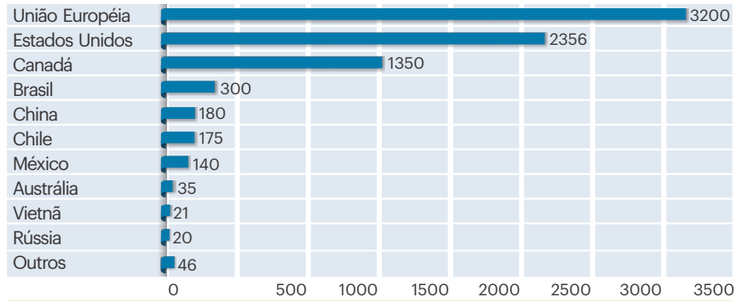


Figura 70 - Ranking mundial de exportação de carne suína (mil toneladas). Fonte: USDA | Foreign Agricultural Service. 2016

Em 2015, a pecuária suína no Brasil registrou 40,33 milhões de cabeças (TABELA 27), com alta de 6,3% sobre 2014. Desse montante, quase metade da produção está situada na região Sul, com 49,3%, e o Paraná é o estado com maior peso nesta atividade, com 17,7% de todo o rebanho nacional (IBGE/PPM, 2015).

Variável - Efetivo dos rebanhos (Cabeças) - Ano - 2015	
Unidade Territorial	**Tipo de rebanho - Suíno - total**
Brasil	40.332.553,00
Paraná	7134055
Santa Catarina	6792724
Rio Grande do Sul	5948537
Minas Gerais	5047216
Mato Grosso	2849158
Goiás	2033914
São Paulo	1484585
Mato Grosso do Sul	1281775
Ceará	1268342
Maranhão	1231823
Bahia	1216322
Piauí	810313
Pernambuco	611234
Pará	557848
Espírito Santo	347621
Tocantins	295661
Rio Grande do Norte	258078
Rondônia	230569
Paraíba	174533
Distrito Federal	155966
Acre	149776
Alagoas	142577
Sergipe	102336
Rio de Janeiro	78089
Amazonas	62613
Amapá	36355
Roraima	30533

Tabela 27 - Efetivo dos rebanhos suínos no Brasil por estado. Fonte: IBGE/PPM (2015).

Fontes de Biomassa

O estado de Minas Gerais ocupa a quarta posição no ranking nacional com um total de 5,04 milhões de cabeças (12,5% do total). Destaque para os municípios de Uberlândia, Urucânia, Patos de Minas, Jequeri e Pará de Minas que, juntos são responsáveis por 31% da produção do estado (TABELA 28).

Variável - Efetivo dos rebanhos (Cabeças) - Ano - 2015	
Unidade Territorial	**Tipo de rebanho - Suíno - total**
Uberlândia (MG)	775.000
Urucânia (MG)	224.220
Patos de Minas (MG)	212.845
Jequeri (MG)	205.222
Pará de Minas (MG)	148.717
Ponte Nova (MG)	139.655
Patrocínio (MG)	137.500
Monte Alegre de Minas (MG)	112.082
Ituiutaba (MG)	91.700
Araguari (MG)	73.199

Tabela 28 - Efetivo dos rebanhos suínos em Minas Gerais por município. - Fonte: IBGE/PPM (2015).

A quantidade total de esterco produzida por um suíno varia de acordo com seu desenvolvimento ponderal, mas apresenta valores decrescentes de 8,5 a 4,9% em relação a seu peso vivo/dia para a faixa de 15 a 100 kg. Cada suíno adulto produz em média 7 a 8 litros de dejetos líquidos/dia ou 0,21 – 0,24 m³ de dejetos por mês. A Tabela 29 apresenta a produção média diária de dejetos.

Categoria	Esterco kg dia-¹	Esterco + Urina kg dia-¹	Dejetos líquidos L dia-¹	Produção m³ animal-¹ mês-¹
Suínos (25-100kg)	2,3	4,9	7,00	0,25
Matriz na gestação	3,60	11,00	16,00	0,48
Matriz na lactação + leitões	6,40	18,00	27,00	0,81
Cachaço	3,00	6,00	9,00	0,28
Leitões na creche	0,35	0,95	1,40	0,05
Média	2,35	5,80	8,60	0,27

Tabela 29 - Produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas de suínos. - Fonte: Oliveira (1993).

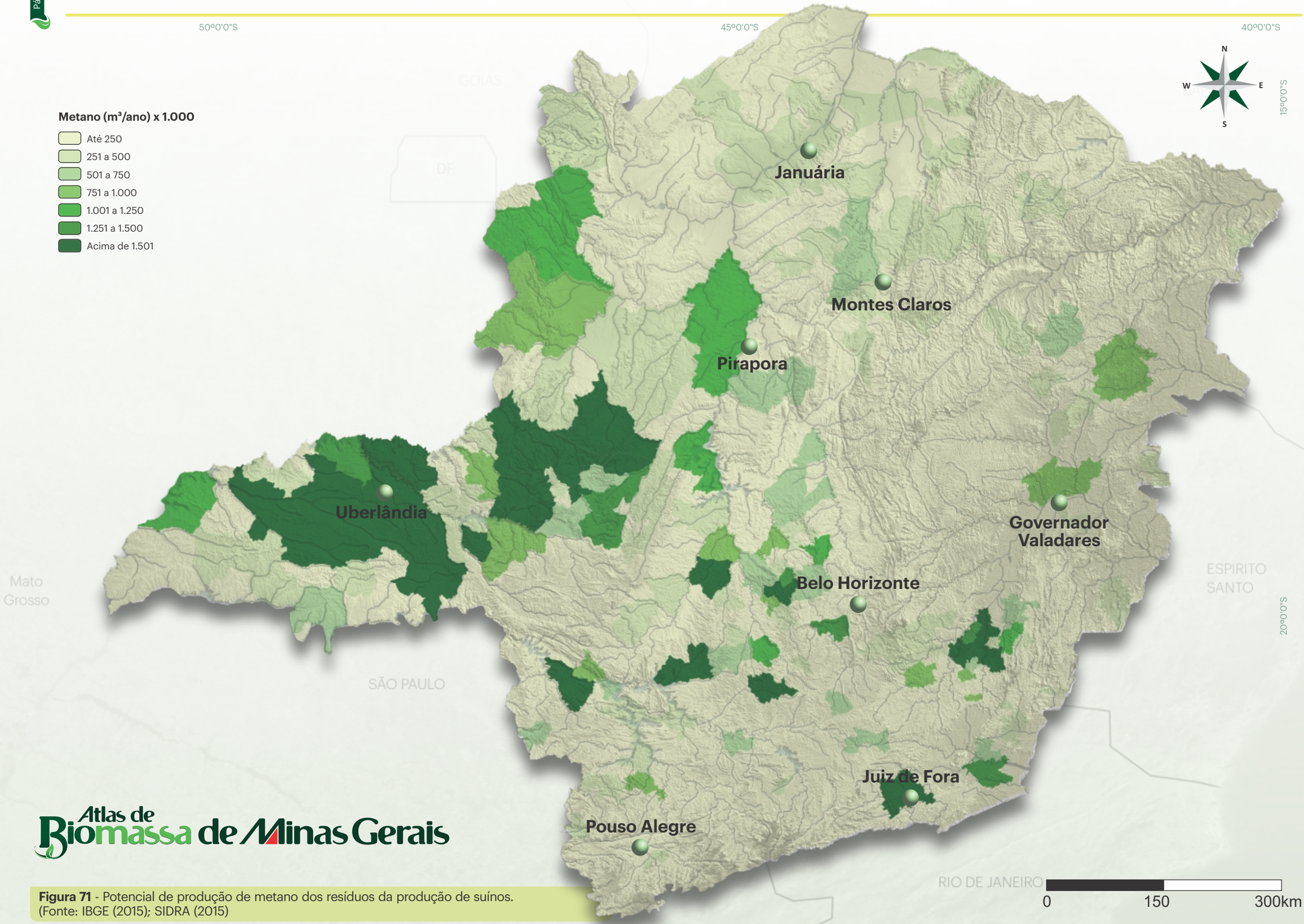
Os dejetos suínos são constituídos por fezes, urina, água desperdiçada pelos bebedouros e utilizada na higienização, resíduos de ração, pelos, poeiras e outros materiais decorrentes do processo produtivo (KONZEN, 1980). Já o esterco, é composto por fezes e urina dos animais com textura pastosa ou sólida. No esterco líquido dos suínos há diversos elementos além da matéria orgânica, como: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, sódio, magnésio, manganês, ferro, zinco, cobre entre outros de acordo com a dieta do animal (DIESEL, 2002)

De acordo com o sistema de manejo, as características dos dejetos de suíno podem variar consideravelmente, como apresentado na Tabela 30.

Variável	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Média (mg/L)
DQO	11.530,20	38.448	25.542,90
Sólidos totais	12.697,00	49.432,00	22.399,00
Sólidos voláteis	8.429,00	39.024,00	16.388,80
Sólidos fixos	4.268,00	10.408,00	6.010,20
Sólidos sedimentáveis	220	850	428,9
Nitrogênio total	1.660,00	3.710,00	2.374,30
Fósforo total	320	1.180,00	577,8
Potássio total	260	1.140,00	535,7

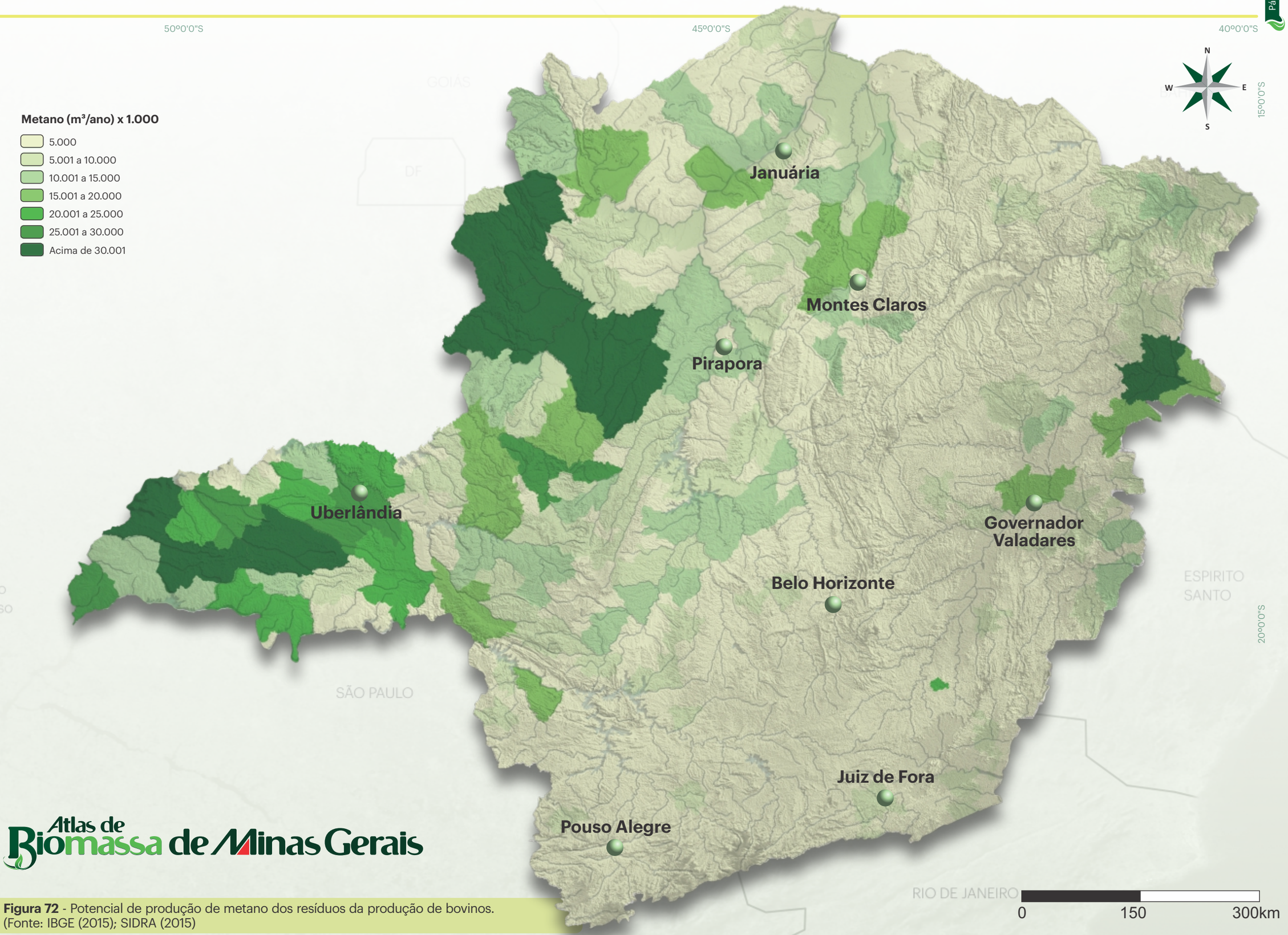
Tabela 30 - Composição química média dos dejetos suínos (obtida na Unidade do Sistema de Tratamento de Dejetos da Embrapa, Concórdia-SC). - Fonte: Silva (1996).

As Figuras 71, 72 e 73 apresentam o potencial de produção de metano dos resíduos da produção de suínos, bovinos e aves, respectivamente. Esse resultado foi obtido a partir da equação 19 descrita no Capítulo 4.



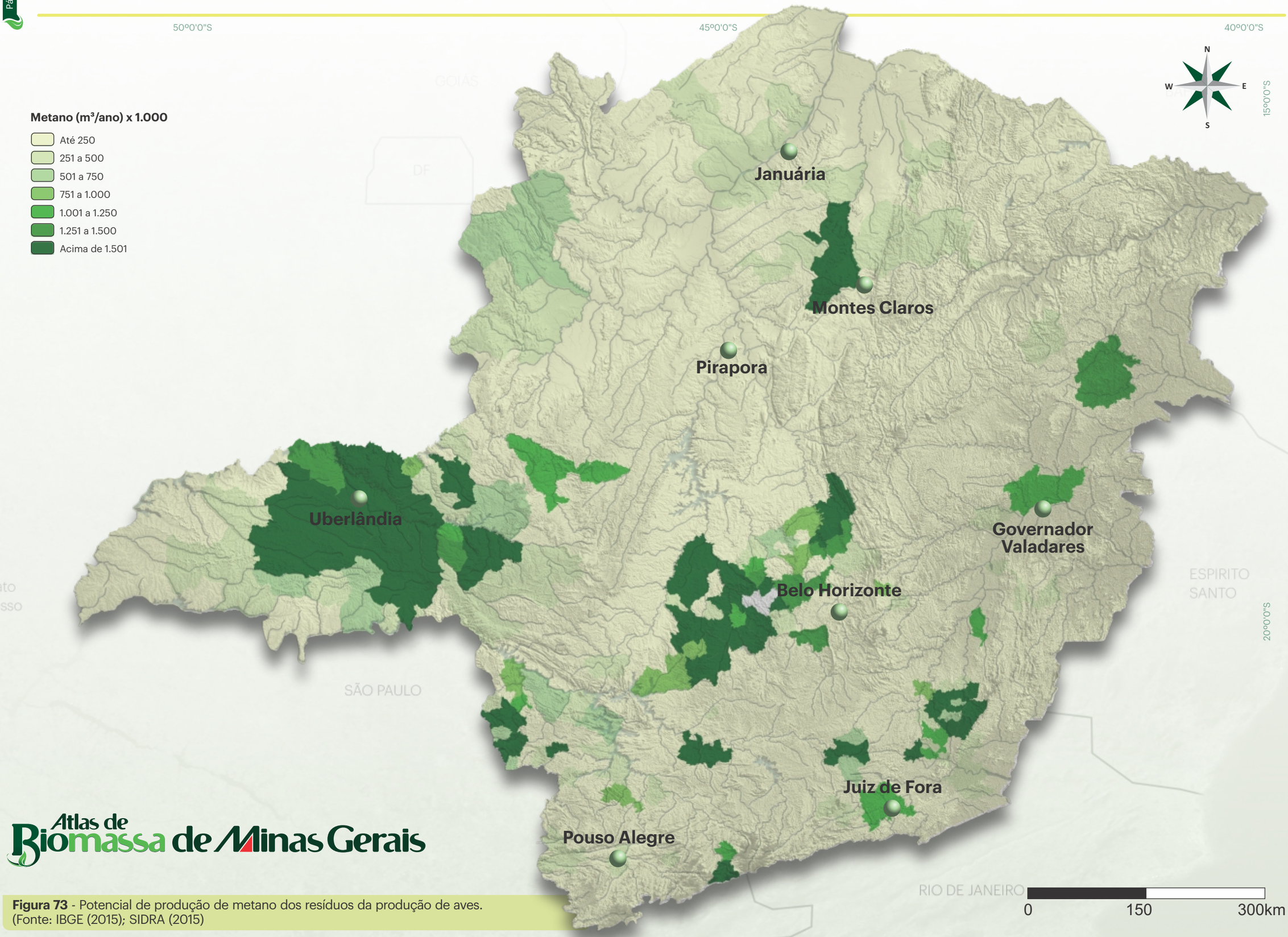
Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 71 - Potencial de produção de metano dos resíduos da produção de suínos.
(Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 72 - Potencial de produção de metano dos resíduos da produção de bovinos.
(Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 73 - Potencial de produção de metano dos resíduos da produção de aves.
(Fonte: IBGE (2015); SIDRA (2015)

3.9 - Outras fontes

Macaúba

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é planta da família *Arecacae*, cujo interesse comercial está no alto teor lipídico da polpa do fruto e da semente. Destaca-se por ser uma palmeira altamente produtiva e nativa do território brasileiro. A Figura 74 ilustra a árvore da macaúba e sua semente.

Figura 74 - Macaúba e sua semente. www.macaubabrasil.com.br

A macaúba é uma planta capaz de produzir grandes quantidades de óleo por unidade de área, além de possuir a capacidade de adaptação a densas populações, que a permite apresentar significativo potencial de produção. Além disso, tem diversas utilidades, com relatos de usos medicinais, alimentícios e cosméticos (NUCCI 2007) e com estudos comprobatórios de potencial para produção de biocombustível, óleos para fins alimentícios e na área oleoquímica (PEREIRA 1996; ARISTONE e OLIVEIRA 2004; NUCCI 2007).

Relatos da utilização de macaúba datam da pré-história (cerca de 9.000 anos a.C.) (MORCOTE-RIOS e BERNAL, 2001). Alguns autores (AZEVEDO FILHO et al., 2012; NOVAES, 1952; BRASIL, 1985) apontam que, nos dias de hoje, os produtos da macaúba são oriundos do extrativismo de plantas ou populações naturais. De acordo com Motta et al. (2002), os principais gargalos para a implantação de plantios comerciais da macaúba seriam a quebra de dormência da semente para produção de mudas e o lento crescimento inicial. A espécie apresenta vasta distribuição espacial (SCARIOT et al. 1995), ocorrendo na América tropical e subtropical, desde o sul do México e Antilhas até o sul do Brasil, chegando ao Paraguai e Argentina (HEDERSON et al. 1995).

Cultivo

Alguns pesquisadores apontam que, as condições mais favoráveis ao cultivo do coqueiro macaúba são encontradas no Brasil, principalmente no Planalto Central, região do cerrado. A cultura não ocorre em regiões de geadas, áreas permanentemente alagadas, áreas litorâneas, áreas montanhosas, clima excessivamente árido e precipitação inferior a 1000 mm. À medida que os palmares se distanciam das proximidades dos rios e córregos e que outras condições ideais sejam limitadas, observa-se um decréscimo do número de indivíduos por área, bem como de cachos e frutos, além do tamanho e peso individuais dos frutos (SILVA, 2007).

No Brasil, a macaúba é considerada a palmeira de maior dispersão, com ocorrência de povoamentos naturais desta espécie em quase todo território. Entretanto, as maiores concentrações estão localizadas em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, sendo amplamente espalhada pelas áreas de Cerrado (BONDAR, 1964; SILVA, 1994; HENDERSON et al., 1995). No passado, ela ocorria em abundância também em São Paulo, mas as populações naturais foram sistematicamente substituídas pelo cultivo do café (NOVAES, 1952).

Motta et al. (2002), em pesquisa sobre a ocorrência da palmeira macaúba no estado de Minas Gerais destacaram que a presença das palmeiras era mais numerosa em áreas com solos de fertilidade natural mais elevada, vegetação primitiva de fisionomia florestal, o que reforça o pioneirismo da espécie, evitando extremos de deficiência de nutrientes e de água. Segundo Novaes (1952), no estado de Minas Gerais, nota-se que a distribuição da palmeira é bastante variável e depende, basicamente, do grau de utilização agrícola do terreno e da fertilidade do solo; coincidentemente, os maiores adensamentos estão em locais mais sujeitos ao manejo agrícola. A Figura 75 apresenta a distribuição geográfica da macaúba.

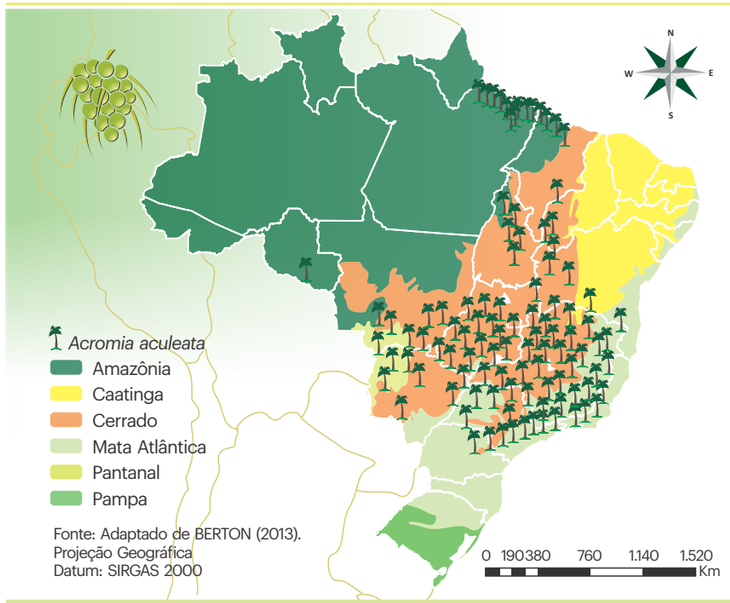


Figura 75 - Distribuição geográfica da macaúba.

A macaúba apresenta elevada produtividade de óleo e coprodutos a partir do quarto ano de crescimento, com vida útil de exploração superior a 25 anos. Atualmente, sua exploração é realizada de forma extrativista, aproveitando os povoamentos nativos da planta. Para a exploração industrial, faz-se necessária a substituição da atividade extrativista por cultivos racionais e sustentáveis. Para viabilizar esse cultivo é fundamental a seleção de genótipos com características desejadas e a produção de mudas padronizadas para se ter uma população homogênea (MOTOIKE et al., 2011).

Segundo a REMAPE (2016), a macaúba pode ser cultivada com viabilidade econômica em diferentes sistemas de produção, dentre eles: cultivo solteiro, cultivo consorciado, sistema silvipastoril e sistema agrossilvipastoril. O espaçamento e a densidade de plantio dependerão do sistema de produção adotado.

Produção

Com potencial produtivo comprovado, para a espécie *Acrocomia aculeata* observada na região do Alto Paranaíba, em Minas Gerais, as melhores plantas alcançaram 6,9 toneladas/hectare de óleo de polpa, utilizado na produção de biocombustíveis (LOBATO, 2014). Desta forma, a macaúba se caracteriza como uma espécie com qualidades importantes do ponto de vista natural, ecológico e principalmente sócio-econômico (NUCCI, 2007).

Os frutos da macaúba são compostos por cerca de 20% de casca, 40% de polpa, 33% de endocarpo e 7% de amêndoa. A Figura 76 apresenta a composição e subprodutos da macaúba. Os teores de óleo são ligeiramente maiores na polpa (60 %), em relação à amêndoa (55%). Da macaúba também se extraem dois tipos de óleo. Da amêndoa é retirado um óleo fino que representa em torno de 15% do total de óleo da planta, rico em ácido láurico (44%) e oléico (26%), tendo potencial para utilizações nobres como na indústria alimentícia, farmacêutica e de cosméticos. O óleo extraído da polpa do fruto é dominado por ácido oléico (53%) e palmítico (19%), e têm boas características para o processamento industrial, tendo maior potencial para a fabricação de biodiesel (BHERING, 2009).

Figura 76 – Composição e subprodutos da macaúba.
Fonte: Os Autores

Collares (2010) afirma que as produtividades potenciais por área se assemelham à do dendê, podendo chegar a mais de 4 mil quilos de óleo por hectare. Estimativas feitas com frutos de macaúba de ocorrência no estado de Mato Grosso do Sul, indicam uma produção de biomassa por hectare de 25.000 kg de frutos, o que resultaria na coprodução de 5.000 kg de casca, 700 kg de torta de amêndoa (contendo cerca de 50% de proteína), 10.000 kg de torta de polpa e 7.000 kg de endocarpo, em base úmida (CICONINI et al., 2013).

Segundo Nobre et. al. (2004), o fruto da macaúba é o produto economicamente mais representativo da palmeira. A polpa do coco (adocicada e aromática) é muito apreciada pelas crianças e também é

utilizada na ração animal (na engorda de suínos). A torta da polpa pode ser utilizada como adubo e combustível para caldeiras, enquanto o farelo da amêndoa tem ótimo índice de proteína e pode ser utilizado na composição de rações para animais. A casca do fruto é utilizada em fornalhas, fogões domésticos e em escala industrial para a produção de carvão. Co-produtos como a cinza estão sendo incorporados ao concreto na construção civil para minimizar o uso de cimento (MACHADO et al., 2010).

A produção de energias renováveis com a possibilidade de incorporação produtiva de áreas degradadas ou inaptas à agricultura de alimentos, torna o Brasil um candidato a liderar as cadeias do setor de energia renovável no mundo, com o desenvolvimento e do uso de tecnologias inovadoras. O Estado de Minas Gerais, indo de encontro às demandas de produção, sancionou a Lei nº 19.485/2011 – Pró-Macaúba, que instituiu a política estadual de incentivo ao cultivo, extração, comercialização, consumo e transformação da macaúba e das demais palmeiras oleaginosas como fonte de energia renovável.

Segundo a Federação da Agricultura e Pecuária do Estado de Minas Gerais (FAEMG), a região de Dores do Indaiá, na região Centro-oeste do Estado de Minas Gerias, se prepara para se transformar no novo polo de produção de macaúba, voltada para a fabricação de bioquerosene para aviação. A Plataforma Mineira de Bioquerosene lançou a Cadeia Extrativista da Macaúba, uma das principais matérias primas para a produção do biocombustível. A Plataforma coordena a implantação da cadeia produtiva do combustível para aviação no Estado. O grupo é composto pela Secretaria de Desenvolvimento Econômico, importantes empresas de aviação civil, como a Boeing, a Embraer, a Gol Linhas Aéreas e a GE do Brasil e a *International Air Transport Association* (Associação Internacional de Transporte Aéreo), além de agências de pesquisa e fomento, como o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o Instituto Interamericano de Cooperação Agrícola (IICA) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Atualmente, existem três indústrias operantes usando o sistema extrativista da exploração no estado de Minas Gerais: Dibio, Paradigma Óleos e UBCM. Além do óleo vegetal, que é o produto principal, essas empresas produzem o farelo e sabão e processam no total cerca de 5.000 toneladas de coco de macaúba por ano (comunicação pessoal, professor Leonardo Pimentel, UFV).

No Norte de Minas Gerais, cidade de Montes Claros, a Cooperativa de Agricultores Familiares e Ambiental do Vale do Riachão (CooperRiachão) conta com uma unidade de beneficiamento do coco da macaúba (UBCM) desde 2003. Composta por 46 sócios, a cooperativa compra os frutos coletados por cerca de 350 famílias em maciços localizados num raio de 50 quilômetros da UBCM. A cooperativa produz até 200 caixas com 50 barras de 200 gramas a cada safra. Outro produto é a ração animal, obtida da torta. Ambos são comercializados no varejo de Montes Claros, e nos municípios vizinhos Mirabela e Coração de Jesus. O óleo excedente é vendido para a Fertibom, uma empresa de Catanduva (SP) que produz biodiesel (Biodiesels, 2014).

Adicionalmente ao extrativismo, o cultivo extensivo da macaúba é necessário para garantir uma produção competitiva e rentável para a indústria de processamento. No entanto, a propagação do cultivo ainda é um desafio a ser superado. Pesquisas da Universidade Federal de Viçosa, rede Macaúba de Pesquisa coordenada pelo professor Sérgio Motoike, buscam transformar uma planta selvagem como a macaúba em uma planta agrícola domesticada, desenvolvendo variedades através do melhoramento genético, adubação, controle de praga e doenças na colheita e pós-colheita da macaúba. Em Minas Gerais, atualmente, a utilização da macaúba como fonte produtora de energia renovável tem sido impulsionada pelo Governo procurando atender as diretrizes de sustentabilidade ambiental, social e econômica definidas no Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), no entanto o estado não possui nenhuma plantação intensiva.

Foto: EMBRAPA / Óleo de Macaúba

Mamona

A manona, *Ricinus communis* L, pertence à família *Euphorbiaceae*, que engloba um grande número de plantas nativas da região tropical. É considerada uma planta de elevada resistência à seca (AMORIM NETO et al., 2001) e sensível ao excesso de umidade por períodos prolongados em especial, na fase inicial e na de frutificação (SILVA, 1981). A Figura 77 apresenta imagem ilustrativa da semente e da planta.

Silva et al. (2007) apontam que o alto conteúdo de óleo, a facilidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas e a fácil adequação ao sistema de produção agrícola familiar fornecem à mamona um papel de destaque.

Figura 77 - Mamona e sua semente

De acordo com Azevedo et al. (1997), o óleo de mamona, extraído pela prensagem das sementes, contém 90% de ácido graxo ricinoléico, o que lhe confere características singulares e versáteis e uma ampla gama de utilização industrial só comparável à do petróleo, embora com a vantagem de ser um produto renovável e barato. Mandail (2006) destaca que esse óleo é ideal para motores de alta rotação sendo utilizado em foguetes espaciais e nos sistemas de freios dos automóveis.

De acordo com Cavalcante (2004), o principal produto da mamona é o óleo, sendo a torta e o farelo os principais subprodutos resultantes da sua extração. Filho et al. (2010), informam que a maior parte dos subprodutos da mamona tem sido utilizada como adubo, uma vez que a mamona apresenta fatores tóxicos (ricina e ricinina) e fator alergênico (glicoproteínas CB-1A).

Segundo Cangemi et al. (2010), a mamona foi escolhida pelo Governo Federal como a matéria-prima prioritária do programa biodiesel devido à geração de emprego e renda em regiões pouco favorecidas do país, uma vez que essa cultura envolve uma grande parte de agricultores familiares.

Cultivo

A mamoneira é uma planta heliófila, assim, precisa estar exposta diretamente ao sol. Tem grande tolerância ao estresse hídrico, porém necessita de solos férteis. Apesar de aceitar bem a seca, com adequada disponibilidade de água sua produtividade é consideravelmente mais elevada. Para cada especificidade climática e condição tecnológica, deve-se procurar escolher um cultivar adequado, pois existe ampla diferença nas características das variedades plantadas no Brasil. A época de plantio da mamona varia de acordo com o estado/região, como apresentado na Tabela 31. EMBRAPA (2016b) aponta para a importância de se aproveitar ao máximo o período chuvoso para plantio e o período de seca para a colheita.

UF/Região	22/09 a 21/12			22/09 a 21/12			22/09 a 21/12			22/09 a 21/12		
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
Nordeste												
PI			■	■					■	■	■	
CE						■	■	■	■	■	■	■
RN								■				■
PE				■	■	■	■				■	■
BA		■	■	■						■	■	■
Sudeste												
MG		■	■			■	■	■	■			
SP	■	■	■				■	■				
Sul												
PR				■					■			

Plantio ■ Colheita ■

Tabela 31 - Calendário de Cultivo da Mamona. Fonte: Adaptado de Conab (2016)

Segundo SIDRA (2015), a distribuição da cultura de mamona no Brasil é de 127.057 hectares, sendo predominantemente na região Nordeste (98,7% da área plantada). Nota-se que não há plantação de mamona em 17 estados mais o Distrito federal. Minas Gerais contem menos de 1% da área plantada do Brasil, como pode ser verificado na Tabela 32.

Mamona	Área plantada (hectares)	Mamona	Área plantada (hectares)
Brasil	**127.057**	Mato Grosso	350
Bahia	115.847	Pernambuco	270
Ceará	8.623	Paraíba	10
Minas Gerais	1.246	São Paulo	2
Piauí	708	Paraná	1

Tabela 32 – Área plantada por estado. - Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal, 2015, Adaptado.

Em Minas Gerais, de acordo com SIDRA (2015), os municípios que tem contribuição no cultivo da mamona, estão distribuídos na região Norte (100% da área plantada do estado). Sendo que as cidades de Matias Cardoso e Porteirinha lideram o ranking de áreas plantadas. Na Tabela 33 verificam-se tais municípios.

Mamona	Área plantada (hectares)	Mamona	Área plantada (hectares)
Matias Cardoso	400	Jaíba	26
Porteirinha	150	Guaraciama	20
Janaúba	80	Nova Porteirinha	20
Monte Azul	80	Catuti	10
Coração de Jesus	70	Januária	10
Espinosa	60	Lagoa dos Patos	10
Itacarambi	50	Mamonas	10
Gameleiras	40	Manga	6
Mato Verde	30	Jequitaí	5
Montalvânia	30	Capitão Enéas	3
Pai Pedro	30	Francisco Sá	3

Tabela 33 - Municípios de Minas Gerais com plantio de mamona. Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal, 2015, Adaptado

Produção

Em termos de produção mundial, o Brasil ocupa a quarta posição com um montante de 37.582 toneladas do grão, ficando atrás de países como China (40.000 ton), Moçambique (61.790 ton) e da líder mundial, Índia, com 1.733.000 toneladas (FAO, 2014). A Tabela 34 apresenta os principais produtores mundiais de mamona.

País	Produção (toneladas)	País	Produção (toneladas)
Índia	1.733.000	Mianmar	10.910
Moçambique	61.790	Paraguai	9.000
China	40.000	Vietnã	7.000
Brasil	37.582	África do Sul	6.100
Etiópia	11.000	Paquistão	6.000

Tabela 34 - Principais produtores mundiais de mamona em 2014. Fonte: FAOSTAT, 2014.

A produção de mamona no Brasil concentra-se na região Nordeste, mais especificamente no Semiárido. A produção dessa planta se dá por

pequenos produtores familiares, em consórcio com culturas alimentares e que não usam cultivares melhorados. A Tabela 35 apresenta os estados produtores de mamona no Brasil de acordo com o SIDRA (2015), com grande destaque para a Bahia, que produz a maior quantidade, com um total de 33.541 toneladas. O Estado de Minas Gerais é o quarto maior produtor dessa planta do país, com pouco mais de 1.100 toneladas.

País	Produção (toneladas)	País	Produção (toneladas)
Bahia	33.541	Piauí	92
Ceará	1.496	Pernambuco	19
Mato Grosso	1.142	Paraíba	8
Minas Gerais	1.117	São Paulo	4
Paraná	163		

Tabela 35 - Produção de mamona por Estado no Brasil.
Fonte: SIDRA, IBGE (2014).

No estado de Minas Gerais, a produção de mamona se concentra na mesorregião do Norte de Minas, sendo que Matias Cardoso é responsável pela maior produção, com 560 toneladas da planta, o que corresponde a aproximadamente 50% da produção total do estado. A outra metade da produção está espalhada entre os outros 26 municípios mineiros. A Tabela 36 apresenta a produção estadual da mamona.

Município	Produção (ton.)	Município	Produção (ton.)
Matias Cardoso	560	Serranópolis de Minas	14
Janaúba	100	Riacho dos Machados	12
Porteirinha	98	Catuti	10
Gameleiras	40	Verdelândia	9
Coração de Jesus	35	Rio Pardo de Minas	8
Monte Azul	30	Mamonas	6
Nova Porteirinha	30	Francisco Sá	3
Pai Pedro	30	Jequitaí	3
São João das Missões	30	Manga	2
Guaraciama	24	Pedras de Maria da Cruz	2
Jaíba	18	Capitão Enéas	1
São Francisco	18	Espinosa	1
Mato Verde	17	Salinas	1
Lagoa dos Patos	15		

Tabela 36 - Produção de mamona por município de Minas Gerais.
Fonte: IBGE - Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, 2015, Adaptado.

Foto: www.laboratoryequipment.com - Pesquisadores da Universidade Estatual do Arizona.

Microalgas

O termo microalga, apesar de não apresentar valor taxonômico, pode ser definido como "microrganismos que podem crescer fotossinteticamente" (SHEEHAN, 1998). Assim como as microalgas, as cianobactérias, que são bactérias gram-negativas, também realizam fotossíntese, e podem se desenvolver em ambientes semelhantes. Muitas espécies de microalgas e cianobactérias podem crescer rapidamente, e são consideradas mais produtivas do que plantas terrestres ou macroalgas. Sua reprodução ocorre principalmente por divisão celular vegetativa (assexuada) embora a reprodução sexuada também possa ocorrer em determinadas espécies, em adequadas condições de crescimento (SHEEHAN, 1998).

Existem milhares de espécies de água doce e marinhas, que atualmente vem recebendo grande atenção, devido ao grande potencial para a indústria de biotecnologia, atribuído graças a características como a maior taxa de crescimento em relação a outras espécies vegetais, a possibilidade de cultivo ao longo de todo o ano, a capacidade de crescerem em áreas impróprias para a agricultura e a habilidade de se desenvolverem nos mais diferentes climas (SAVAGE e HESTEKIN, 2013).

Atualmente, as microalgas são comercialmente cultivadas para fabricação de produtos de elevado valor nutricional, com uso em seres humanos e animais, pois são conhecidos efeitos antioxidantes, imunológicos e anticancerígenos, sendo fontes de produtos de alto valor agregado como carotenoides e ômega 3. Benemann (2009) estima que a produção anual em todo o mundo seja algo em torno de 10.000 toneladas.

Em relação à produção de microalgas para biocombustíveis, um número crescente de empresas está envolvido em testes para desenvolvimento de combustíveis para aviação à base de algas. Em julho de 2010 foi realizado o primeiro voo de uma aeronave movida por combustível produzido à base de algas. O voo foi feito em um Diamond Aircraft DA42 Nova Geração, avião de hélice dupla, na Exposição Internacional Aeroespacial de Berlim. Outro exemplo da aplicação real é o acordo feito em dezembro de 2011 entre a empresa aérea Lufthansa com a Empresa Algae Tec® para avaliar o potencial das algas como matéria prima para a produção de biocombustíveis para a aviação. A Figura 78 mostra a distribuição global e empresas privadas que produzem derivados de microalgas para alimentação comercial e para suplementos alimentícios.

A Tabela 37 apresenta algumas empresas que comercializam combustíveis de algas.

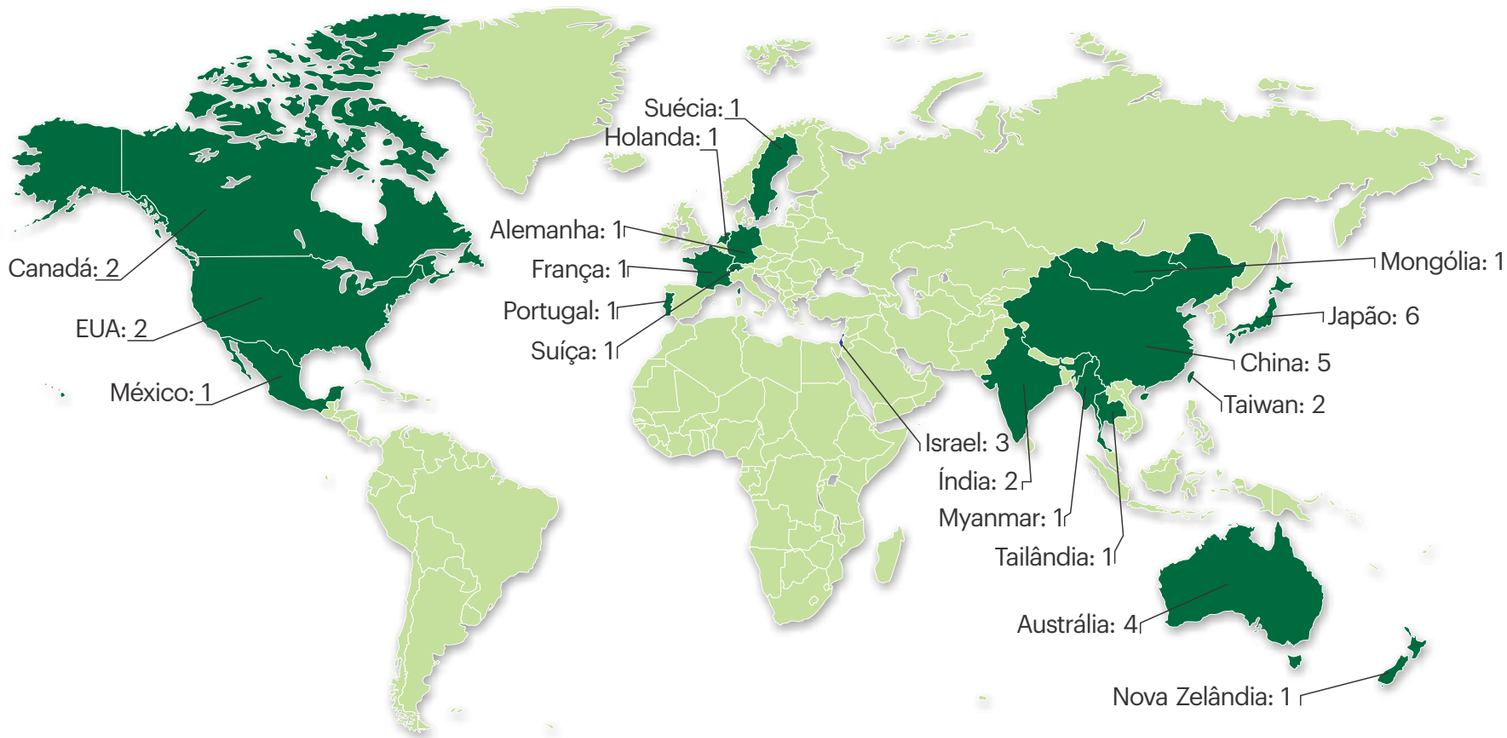


Figura 78 - Distribuição global de empresas privadas que produzem derivados de microalgas para alimentação comercial e para suplementos alimentícios.- Fonte: Adaptado de Vigani et al., 2015.

Empresa	Localização	Referência
Algenol Biofuels Bonita	Springs, EUA	algenolbiofuels.com
Aquaflow Nelson,	Nova Zelândia	aquaflowgroup.com
Aurora Algae, Inc.	Hayward, EUA	aurorainc.com
Bioalgene	Seattle, EUA	bioalgene.com
Bionavitas, Inc.	Redmond, EUA	bionavitas.com
Bodega Algae, LLC	Boston, EUA	bodegaalgae.com
Joule Unlimited, Inc.	Bedford, EUA	jouleunlimited.com
LiveFuels, Inc.	San Carlos, EUA	livefuels.com
OriginOil, Inc.	Los Angeles, EUA	originoil.com
Parabel, Inc.	Melbourne, EUA	parabel.com
Phyco Biosciences	Chandler, EUA	phyco.net
Sapphire Energy, Inc.	San Diego, EUA	sapphireenergy.com
Seambiotic Ltd.	Tel Aviv, Israel	seambiotic.com
Solazyme, Inc.	South San Francisco, EUA	solazyme.com
Solix Biofuels, Inc.	Fort Collins, EUA	solixbiofuels.com

Tabela 37 - Algumas empresas startup que comercializam combustíveis de algas.

Microalgas necessitam de água e nutrientes, como nitrogênio (N) e fósforo (P), para se desenvolverem. Todavia, para a produção em escala comercial são necessárias grandes quantidades desses insumos. Considerando a reação de produção de biomassa apresentada por Oswald (1988), o requerimento de N e P é de, pelo menos, 9,2% e 1,3% em massa, respectivamente.

$$106CO_2+236H_2O+16NH_4^+ + HPO_4^{-2} \rightarrow C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P+118O_2+171H_2O+14H^+$$

Em um cenário de atendimento a 5% da demanda mundial de óleo em 2016, que é de 95,8 milhões de barris (IEA, 2015), com uma cultura de microalgas com 40% de óleo, com 95% de recuperação do óleo após o processamento e assumindo a densidade igual ao óleo de palma, de 0,887 kg L^{-1} (CHISTI, 2013), seriam necessárias 59,5 milhões de toneladas de N para atender a essa produção. Esse valor é equivalente a 57% do que foi consumido na agricultura em todo mundo, no ano de 2010 (HEFFER, 2013). Além disso, seriam necessários 8,4 milhões de toneladas de fósforo. O consumo de água seria de 2,5 bilhões de m³, considerando a pegada hídrica de 3.700 kg . kg^{-1} de biodiesel produzido (CHISTI, 2013).

Esses valores mostram que o cultivo de microalgas para biocombustíveis a partir da utilização de água potável e fertilizantes comerciais é inviável, uma vez que estabeleceria uma competição com culturas alimentícias, com consequências ruins para ambas as partes. Mais do que isso, o atendimento a ambos setores não seria possível. A produção de fertilizantes consome muita energia, aproximadamente 1,2% do consumo mundial (CHISTI, 2013) e também utiliza combustíveis fósseis. Portanto, elevar a produção seria um contrassenso dentro do contexto em que as microalgas estão inseridas, que é de geração de energia renovável e sustentável. Tudo isso deixa evidente a necessidade de se utilizar fontes de água e nutrientes alternativas para o cultivo de microalgas, com implantação de ciclos de reaproveitamento.

Efluentes domésticos, agrícolas e industriais podem representar fontes de água e nutrientes para o cultivo de microalgas, constituindo importante alternativa para o suprimento de insumos para a produção. Enquanto crescem, as microalgas removem os nutrientes e depuram o efluente, que pode ser utilizado em diferentes atividades que não necessitam de água potável. Dessa forma, a exploração do potencial das microalgas para biorremediação de efluentes e a utilização da biomassa como um subproduto do tratamento representa oportunidade para superar as dificuldades mencionadas.

Em todo o mundo, cerca de 450 bilhões de m³ de água por ano são utilizados nas atividades domésticas e industriais (FLORKE et al., 2013). Considerando um coeficiente de retorno de 0,8, isso representa a geração de 360 bilhões de m³ de efluentes, que necessitam de tratamento por questões ambientais e de saúde pública. Diante do avanço da conscientização em relação aos aspectos ambientais, e, portanto, da sustentabilidade de novos processos de produção, ressalta-se não apenas a importância da busca por tecnologias eficientes na remoção de poluentes, mas que também permitam o aproveitamento e a valorização dos nutrientes presentes em excretas humanas e outros tipos de efluentes. Esses efluentes podem ser utilizados como fonte de nutrientes de baixo custo para o cultivo de microalgas. A integração do tratamento de efluentes com a produção de biomassa algal possibilita o aproveitamento dos nutrientes e não apenas a redução de seu lançamento nos corpos receptores.

Essa prática contribui para a implantação do conceito de resíduo zero no processo de obtenção de biocombustíveis de microalgas, uma vez que reduz, ou mesmo elimina, a utilização de fertilizantes químicos (CHEN et al., 2015). Além disso, a pegada hídrica do processo também pode ser reduzida em até 90% (YANG et al., 2011), uma vez que na fase de cultivo, o consumo de água seria devido apenas às perdas por evaporação.

Produção

Microalgas podem ser cultivadas em diferentes tipos de sistemas, sendo as lagoas de alta taxa (LATs) e fotobiorreatores fechados tubulares e de placa plana os mais destacados na literatura (VASUMATHI et al., 2012). Os fotobiorreatores fechados superam os reatores abertos em diversos aspectos, dentre eles citam-se: são usualmente construídos com elevada razão superfície/volume - o que maximiza a exposição da cultura à luz - permitem maior controle das condições de cultivo (controle automatizado de pH, suplemento de CO_2, mistura, dentre outros) e reduzem o risco de contaminação. No entanto, a elevada demanda energética, os custos operacionais, a possibilidade de ocorrência do *biofouling*, superaquecimento, estresse hidrodinâmico de culturas, dentre outras complexidades construtivo-operacionais ainda restringem sua aplicação em escala real. Soma-se a isso o fato de que as LATs se inserem perfeitamente no contexto de uma estação de tratamento de efluentes (ETE), por se tratarem de avanço tecnológico em relação a lagoas de estabilização convencionais utilizadas para o tratamento de águas residuárias.

De acordo com BENEMANN (2009), quase todos os produtores comerciais utilizam lagoas abertas, consideradas como a forma mais viável economicamente para se produzir biomassa algal com mínimo impacto ambiental negativo. As Figura 79 e 80 apresentam exemplos de produção comercial em lagoas de alta taxa.

Figura 79 - Lagoas de produção de Spirulina. Foto: www.earthrise.com

Figura 80 - Hawaii, produção de Haematococcus pluvialis (lagoas vermelhas) e Spirulina.

A produtividade de biomassa das LATs se mantém abaixo de 1 kg/m³, com valores médios de 0,2 e 0,6 kg/m³ (TREDICI, 2007; CROMAR e FALLOWFIELD, 1997).

Pinhão manso

Figura 81 - Pinhão manso. Foto: Thiago Herzog

O pinhão manso (*Jatropha curcas* L.), também conhecido como pinhão-paraguaio, figo-do-inferno e pinhão bravo, é uma espécie de *Euphorbiaceae*, mesma família da mamona (*Ricinus* sp.), da mandioca (*Manhiot* sp.) e da seringueira (*Hevea* spp.) (LAVIOLA e DIAS, 2008). O seu nome é derivado do grego "*jatrós*" (doctor) e *trophé* (alimento), devido a suas aplicações medicinais. A atividade biológica e química dos constituintes da *Jatropha curcas* tem sido investigada, principalmente a toxialbumina jatrofina (curcina) (BARBIERI et al., 1993; HUANG et al., 1991; LIN et al., 2002).

O pinhão manso é um arbusto de crescimento rápido, caducifólio, que pode atingir mais de 5 m de altura. Seus frutos contêm, via de regra, três sementes, sendo uma semente por lóculo e estas apresentam teor de óleo variando entre 30 e 40% (CARNIELLI, 2003) e representam entre 53 e 79% do peso do fruto (SATURNINO et al. 2005). A Figura 81 ilustra o pinhão manso.

Sua rusticidade, resistência a longas estiagens, bem como às pragas e doenças, além de sua facilidade de adaptação a condições edafoclimáticas variáveis, permitem uma distribuição geográfica em quase todas as regiões intertropicais, sendo em maior escala nas regiões tropicais e temperadas e, em menor extensão nas regiões frias (NUNES, 2007).

O pinhão manso pode ser considerado uma das mais promissoras oleaginosas para substituir o diesel de petróleo devido a sua alta produtividade de óleo, seu baixo custo de produção, por ser perene, possuir elevado rendimento de sementes, além de sua extrema resistência ao estresse hídrico, uma grande vantagem para o semiárido brasileiro. No entanto, é uma cultura que causa grande apreensão, pois o conhecimento técnico que se tem sobre ela é extremamente limitado.

De acordo com Laviola e Dias (2008), os resultados de pesquisas com a cultura do pinhão manso são ainda incipientes e preliminares, embora seja possível notar expansão da área cultivada com essa espécie. Apesar do potencial destacado, a espécie está em fase de domesticação. Ações técnico-científicas e investimentos públicos e privado têm focado a pesquisa e o desenvolvimento para utilização desta oleaginosa em futuro próximo.

Cultivo

Arruda et al. (2004) apontam que, apesar de pouco exigente em condições climáticas e solo fértil, o pinhão manso se desenvolve melhor em solos profundos, bem estruturados e pouco compactados, pois sob essas condições, o seu sistema radicular se desenvolve melhor e explora maior volume de solo, satisfazendo a necessidade da planta em nutrientes. ZANON (2012), aponta que as raízes do pinhão não se desenvolvem em solos ácidos (com pH abaixo de 4,5).

O cultivo do pinhão manso pode ser realizado por meio de sementes, na qual a planta demora dois anos para produzir a primeira colheita, ou, por via vegetativa (estacas). Por meio de estacas a primeira produção se obtém no mesmo ano, com a vantagem de que a planta não sofre variabilidade pela possiblidade de cruzamento com outras plantas (CASTELLANOS, 2006). Para assegurar bom desenvolvimento das plantas, a melhor época para o plantio é no início das primeiras chuvas. No entanto, quando se dispõe de água para irrigação, o plantio pode ser feito em qualquer época (ARRUDA et al, 2004).

Recentemente, o plantio e as pesquisas com pinhão manso vêm crescendo no México, Índia, China, Brasil e países da África (BRASILEIRO, 2010). O produto extraído da semente tem sido sugerido para fins energéticos. Suas qualidades têm sido observadas como promissoras para a produção de biodiesel mostrando que a utilização do pinhão manso apresenta-se dentro das características exigidas pelas especificações da Petrodiesel.

Produção

Em alguns países, como a Índia, o cultivo de pinhão manso tem como objetivo a produção de biodiesel. Na região de Coimbatore, segundo do Rosário (2006), a produção em viveiro ultrapassa trezentas mil mudas. Na Nicarágua, um projeto com o mesmo objetivo da Índia não logrou êxito devido a vários fatores, dentre eles, o conflito de posse e uso de terra. Já no Egito, desde 2003 já foram plantados cerca de 5 mil hectares no deserto. Ainda de acordo com a autora, a Índia é um dos países com maior potencial de produção de Jatropha em nível mundial.

Em Minas Gerais, a produção está concentrada no Vales do Mucuri e Jequitinhonha, no Norte do estado e Triângulo mineiro, com o objetivo de produzir mudas, sementes e desenvolver pesquisas (SATURNINO et al., 2005). Portanto, cultivos comerciais de pinhão manso não são encontrados no estado. A Tabela 38 apresenta a distribuição da produção do pinhão-manso no estado de Minas Gerais.

Município	Área plantada (ha)	Número de plantas	Objetivo e/ou destino da produção
Arinos	-	4000	Mudas
Diamantina	-	-	Pesquisa
Janaúba	31	-	Pesquisa e mudas
Lavras	-	-	Pesquisa UFLA
Leme do Prado	0.8	-	Pesquisa e mudas
Matias Cardoso	20	-	Mudas
Nova Porteirinha	5	-	Pesquisa e mudas
Novo Cruzeiro	5	-	Mudas
Paracatu	-	-	Mudas
Santa Vitoria	9.6	9600	Pesquisa Coval
Sete Lagoas	-	2000	Sementes
Uberaba	-	-	Pesquisa Uniube
Uberlândia	-	1700	Pesquisa Ferub
Viçosa	-	-	Pesquisa

Tabela 38 - Produção do pinhão manso no Estado de Minas Gerais. Fonte: Adaptado de Saturnino et al. (2005).

A Figura 82 apresenta os locais com plantio de pinhão manso em Minas Gerais.

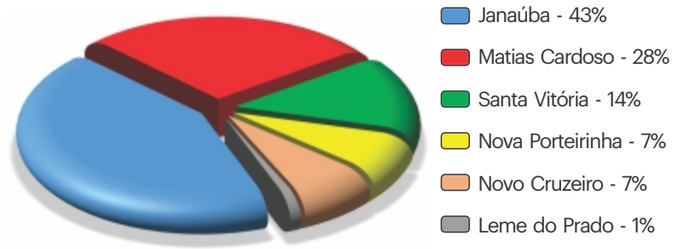


Figura 82 - Áreas plantadas de pinhão-manso por município no estado de Minas Gerais - Fonte: Saturnino et al. (2005)

A produtividade do pinhão manso é variável, em função da região de plantio, do método de cultivo e tratos culturais, da idade da cultura, bem como da quantidade de chuva e fertilidade do solo. CARNIELLI (2003), acredita que o pinhão manso produza, pelo menos, 2 toneladas de óleo por hectare/ano. PURCINO E DRUMMOND (1986) observando uma área de baixada irrigada com boa fertilidade, onde havia antes um bananal, em Minas Gerais, que o pinhão começou a produzir logo no 2º ano, atingindo 2 toneladas/ha de sementes. Os autores apontam um potencial de produção do pinhão em semente, pelas produções das melhores plantas, 6.468 e 6.373 kg/ha no 1º ciclo de colheitas. Teixeira (2005) aponta uma produtividade média de pinhão manso de 5 t/ha, com a cultura estabelecida e em condições favoráveis, e, cerca de 32% deste valor pode ser convertido em óleo vegetal (aproximadamente 1600 L ha^{-1}). Para Openshaw (2000) e Fernando (2006), a produtividade do pinhão manso pode variar de 0,5 até 12 toneladas ha^{-1} e pode se estender por mais de 30 anos, sendo dependente do tipo de solo, disponibilidade de nutrientes e regime de chuvas.

Como ponto favorável para o investimento na cultura, Basha et al. (2009) avaliam que o cultivo da espécie requer pouca tecnologia e baixo investimento inicial.

Capítulo 4

4 - Potencial Energético da Biomassa

4.1. Poder Calorífico

4.2. Potencial Energético do Café

4.3. Potencial Energético Cana de Açúcar

4.4. Potencial Energético do Milho

4.5. Potencial Energético da Soja

4.6. Potencial Energético dos Vegetais Lenhosos

4.7. Potencial Energético Resíduos Sólidos Urbanos

4.8. Potencial Energético Efluentes Líquidos Domésticos

4.9. Potencial Energético Efluentes Líquidos Animais

4.1 - Poder Calorífico

Poder calorífico é a medida da quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível, em forma de calor, podendo ser expresso em cal/g, kcal/kg, para os combustíveis sólidos, ou kcal/Nm³, para os combustíveis líquidos e gasosos. É possível obter três formas de poder calorífico, ou seja, o poder calorífico superior, inferior e útil. O poder calorífico superior é determinado em equipamentos denominados calorímetros, sob condições controladas, e representa a quantidade máxima de calorias que o combustível libera quando queimado totalmente, pois não é perdido o calor latente do vapor d'água. O poder calorífico inferior é estimado a partir do poder calorífico superior e do teor de hidrogênio do combustível, ou seja, aqui desconta-se o calor latente do vapor d'água. Cálculos teóricos das entalpias de formação da água retida no estado líquido e perdida no estado gasoso indicam que o calor latente do vapor d'água seria de aproximadamente de 600 cal/g. Essa quantidade de energia é perdida quando o vapor d'água sai do sistema.

Existem diversas equações para estimar o poder calorífico interior, por exemplo, pode ser considerada a equação 1.

Equação 1 $$PCI = PCS - 600 \; x \; 9H/100$$

onde, PCI é o poder calorífico inferior, PCS o poder calorífico superior e H é o teor de hidrogênio do combustível.

Na prática pode-se considerar, por exemplo, que a biomassa de eucalipto, possua aproximadamente 6% de hidrogênio na sua composição química elementar e, dessa forma, a equação 1 pode ser simplificada conforme a equação 2.

Equação 2 $$PCI = PCS - 324$$

Pelas equações 1 e 2 pode-se verificar que o teor de umidade presente no combustível não é considerado, assim essa estimativa de poder calorífico somente é aplicada caso o combustível seja utilizado na forma anidra, ou seja, isento de umidade. Segundo Brand (2010) se o combustível possuir umidade deve-se descontar ainda o calor necessário para evaporar essa água e obter o poder calorífico líquido ou útil. Esse valor representa a quantidade de energia térmica a ser realmente liberada em virtude da queima do combustível.

Segundo Lehtovaara (2004), citado por Brand (2010), para a madeira o poder calorífico líquido ou útil, considerando a umidade na base úmida, pode ser estimado pela equação 3.

Equação 3 $$PCU = PCI \; x \left[\left(\frac{100 - U}{100}\right)\right] - (6 \; x \; U)$$

em que, PCU é o poder calorífico útil, PCI é o poder calorífico inferior, obtido pela equação 1 ou 2, e U é o teor de umidade, base úmida.

Doat (1977), citada por Brito e Barrichelo (1982), propôs uma forma para a estimativa do PCU com base a umidade na base seca. A equação 4 mostra essa forma de cálculo.

Equação 4 $$PCU = \left[\left(\frac{PCI - (6 \; x \; U)}{100+U}\right)\right] x \; 100$$

onde, U é o teor de umidade, na base seca.

Brand (2010) comparando o resultado fornecido pela equação 3 e o poder calorífico medido em laboratório para amostras de madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* encontrou diferença insignificante entre as duas formas de medição do poder calorífico útil, demonstrando a eficiência da equação. A escolha de qualquer um dos poderes caloríficos descritos anteriormente exerce influência sobre os cálculos de rendimento em sistemas térmicos. Nogueira e Lora (2003), citados por Brand (2010), relatam a importância de deixar bem claro qual foi o poder calorífico utilizado nos cálculos de eficiência e perdas de calor em fornos e caldeiras, pois utilizando o PCS, PCI ou PCU os valores de eficiência serão diferentes.

Além do poder calorífico com base na massa de material, pode-se determinar o mesmo com base o volume do combustível. Para se estimar esta forma de valor calórico ou o poder calorífico volumétrico deve-se conhecer a densidade do combustível utilizado. A estimativa de poder calorífico volumétrico para o caso da madeira pode ser obtida pelas equações 5 ou 6.

Equação 5 $$PCV = DB \; x \; PCS$$

Equação 6 $$PCV = DA \; x \; PCU$$

em que, DB é a densidade básica (kg/m³) e DA é a densidade aparente da madeira (kg/m³), obtida em dado teor de umidade.

Para os cálculos do potencial gerado pelas diferentes fontes de biomassas agrícolas e florestais, será utilizado o poder calorífico útil (PCU), ou seja, será considerado a umidade da biomassa para os cálculos.

Pode-se observar na Tabela 39, alguns exemplos de PCU para alguns tipos de biomassa. Fica evidente que quanto maior a umidade, menor é sua capacidade de conversão em energia térmica.

Biomassa	H (%)	PCS	PCI	PCU (10%)	PCU (20%)	PCU (30%)	PCU (40%)
Café[b,c]	6,3	4.364	4.024	3.562	3.099	2.637	2.174
Madeira[a,b]	6,6	4.579	4.223	3.741	3.258	2.776	2.294
Milho[a]	6,6	4.414	2.057	3.591	3.126	2.660	2.194
Soja[a]	6,55	4.266	3.913	3.461	3.010	2.559	2.108
Arborização[d]	5,41	5.059	4.767	4.230	3.693	3.157	2.620

Sendo: H (%) – Teor de Hidrogênio médio (%); PCS – Poder Calorífico Superior (kcal/kg); PCI – Poder Calorífico Inferior (kcal/kg); PCU – Poder Calorífico Útil (kcal/kg) em função da Umidade (%).

Tabela 39 - Exemplos de poder calorífico útil para alguns tipos de biomassa. - Fonte: (a) Ramos e Paula et al. (2011); (b) Protásio et al. (2011); (c) Jardim (2014); (d) Souza (2014).

4.2 - Potencial Energético do Café

Para a estimativa do potencial energético a partir da casca do café, foi levado em conta os valores das produções municipais de Minas Gerais no período de 2010 a 2015. A eficiência de conversão para os resíduos adotada foi de 15%, de baixo rendimento termodinâmico - sistemas compostos de caldeira de 20 bar, turbina de condensador atmosférico.

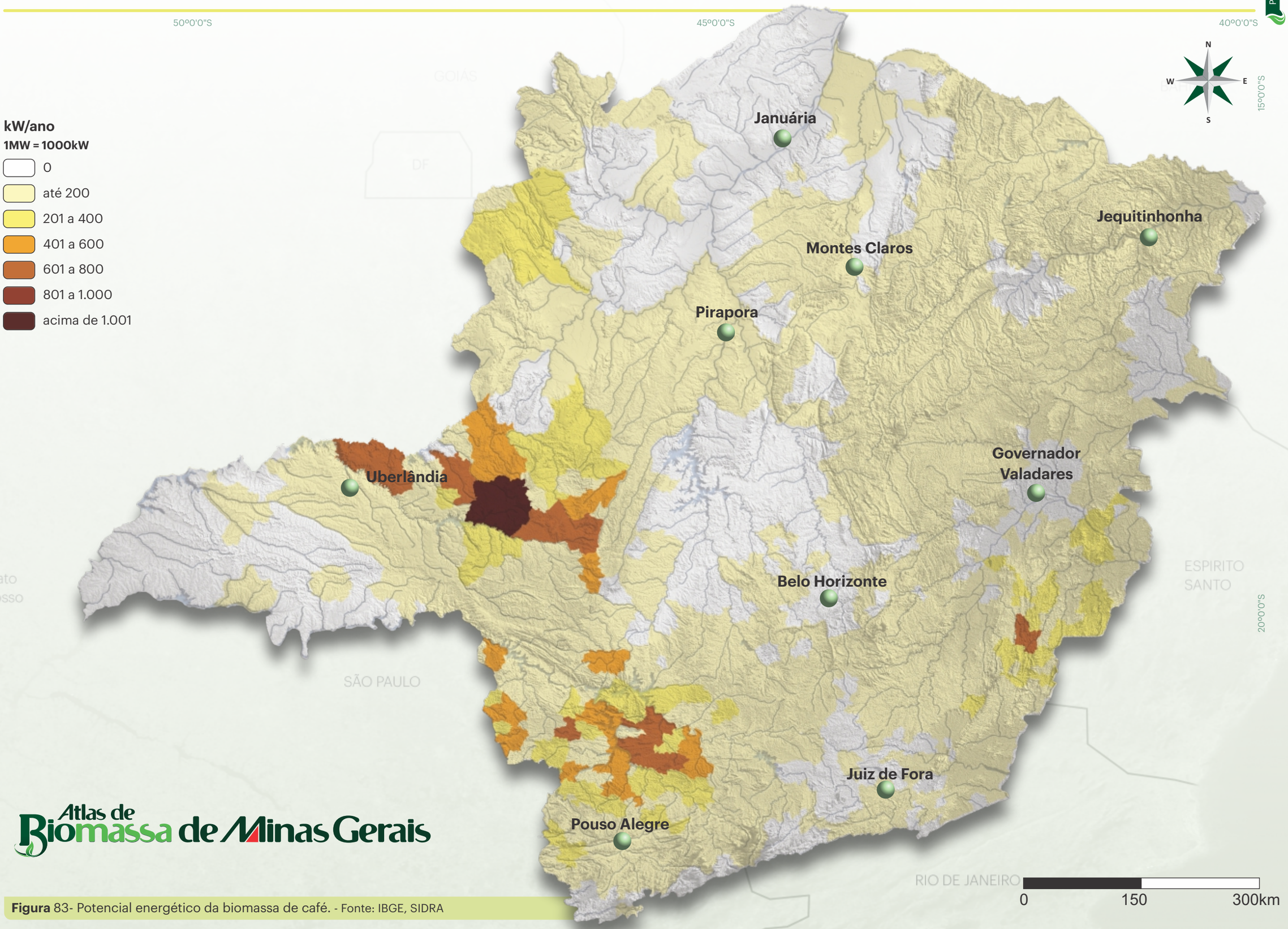
O dado apresentado pelo IBGE é em toneladas de café beneficiado, portanto é necessário considerar a casca como resíduo agrícola aproveitável, que apresenta um fator de conversão de 1:1, ou seja, uma tonelada de café beneficiado gera uma tonelada de casca mais pergaminho (GIOMO, 2006). O poder calorífico útil da casca foi considerado 3.399,8 kcal/kg com 13,5% de umidade. Será utilizado um fator de disponibilidade para coleta de 40%, ou seja, o restante deve permanecer no campo para garantir a sustentabilidade do processo. Considera-se que a geração de energia elétrica ocorra em 95% das horas anuais, correspondendo a 8322 horas. A conversão de kcal/kg para kWh/kg se dá pela divisão por 860. O cálculo do potencial a partir desse resíduo foi efetuado pela equação 7 (FIGURA 83).

Equação 7

$$Potencial_{café}\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{café} * F_C * PCU * F_D * \eta}{8322 * 860}$$

em que,
$t_{café}$ - produção de café (toneladas);
F_C - fator de conversão de tonelada café para tonelada de biomassa = 1,0;
PCU - poder calorífico útil a 13,5% de umidade = 3399,8 (kcal/kg);
F_D - fator de disponibilidade para coleta 0,4;
η - eficiência de conversão = 0,15;
8322 - 95% das horas anuais;
860 - conversão de kcal/kg para kWh/kg.

Foto: Federação dos Cafeicultores do Cerrado Mineiro



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 83- Potencial energético da biomassa de café. - Fonte: IBGE, SIDRA

4.2 - Potencial Energético Cana-de-Açúcar

Bagaço

Para a estimativa do potencial energético a partir do bagaço da cana de açúcar, foi levado em conta os valores das produções municipais de Minas Gerais no período de 2010 a 2015, os dados de plantio de cana e produção foram obtidos junto a SIAMIG (2017) e o IBGE (2015), respectivamente. Foram considerados três cenários, de acordo com a metodologia CENBIO (2012) para cana de açúcar.

Cenário 1 – 30 kW/tonelada de cana moída:

Equação 8

$$Potencial\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{cana} * 30\ kW/t}{1000 * 5563}$$

Considera-se que o sistema opere somente durante a safra com os resíduos gerados (abril a novembro) resultando em 5563 horas de operação por ano e que (t_{cana}) = produção em toneladas de cana.

Cenário 2 – 60 kW/tonelada de cana moída:

Equação 9

$$Potencial\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{cana} * 60\ kW/t}{1000 * 5563}$$

Considera-se que o sistema opere somente durante a safra com os resíduos gerados (abril a novembro) resultando em 5563 horas de operação por ano.

Cenário 3 – 120 kW/tonelada de cana moída:

Equação 10

$$Potencial\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{cana} * 120\ kW/t}{1000 * 8322}$$

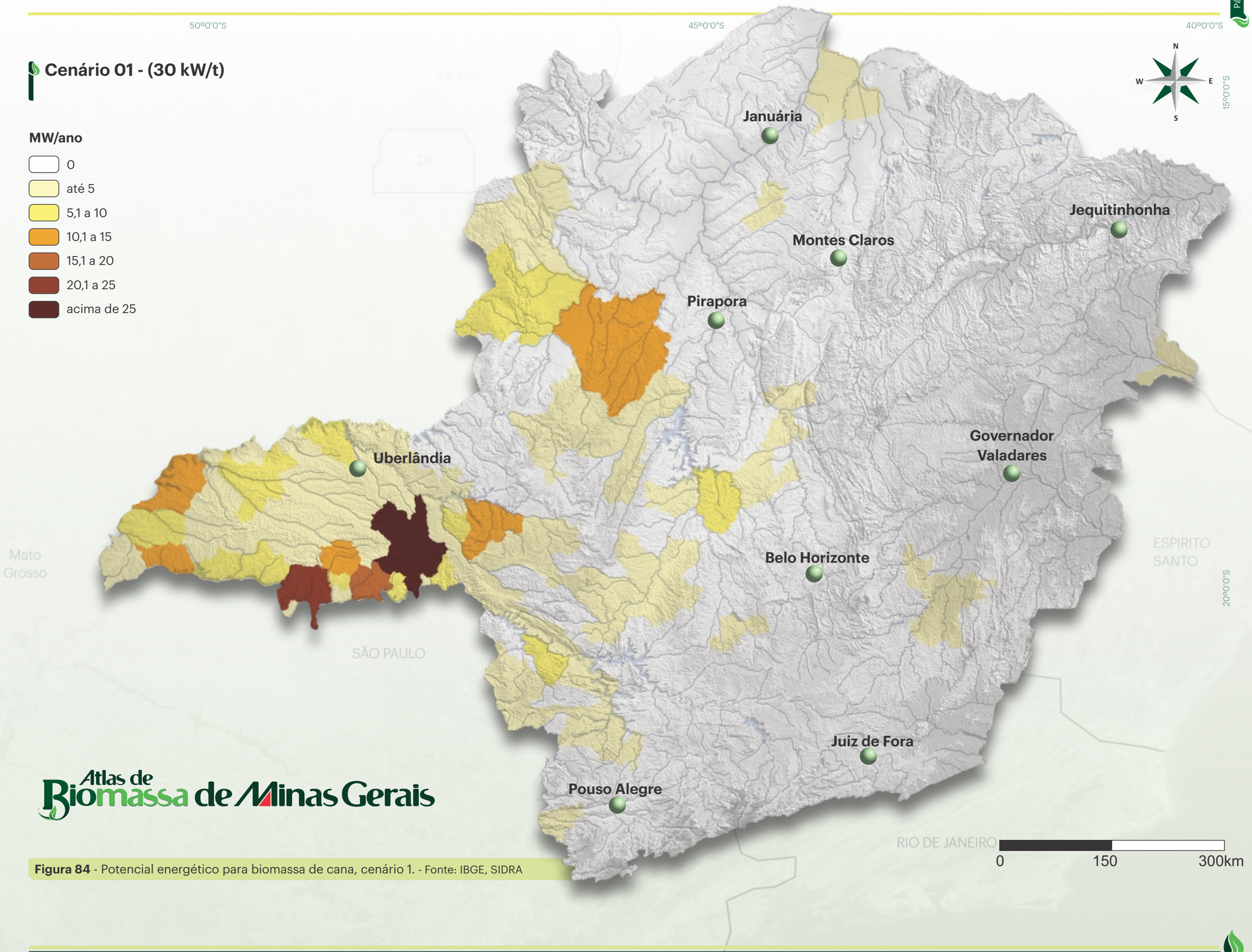
Considera-se que o sistema opere o ano todo com os resíduos gerados e que a operação ocorra em 95% das horas anuais, o que resulta em 8322 horas de operação/ano. Neste caso são considerados, além do bagaço, a palha e as pontas, resultantes da colheita da cana crua.

As Figuras 84, 85 e 86 apresentam o potencial energético da biomassa de cana de açúcar para Minas Gerais, considerando os cenários de 30, 60 e 120 kW/tonelada de bagaço, respectivamente.

Cenário 01 - (30 kW/t)

MW/ano

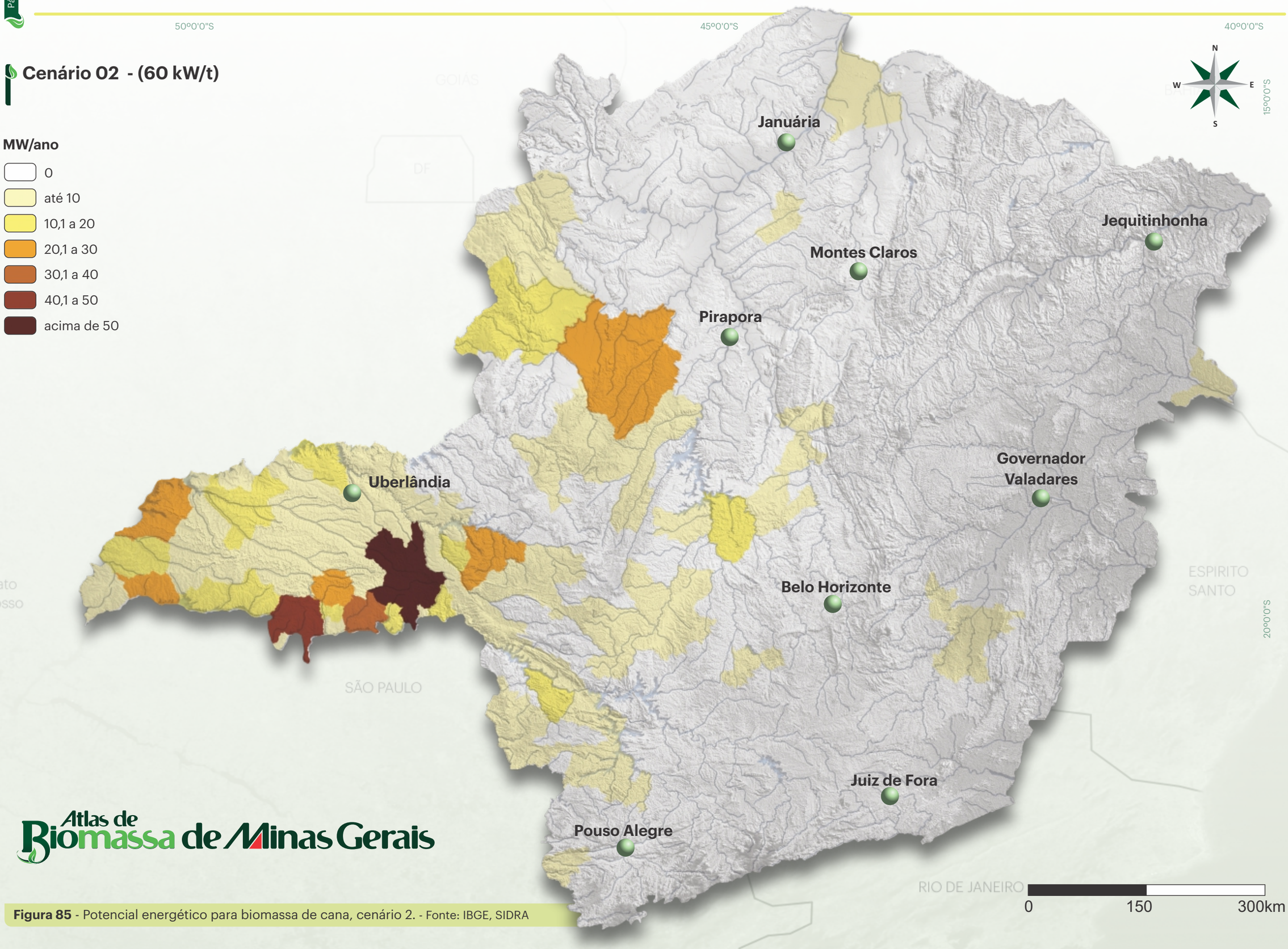
- 0
- até 5
- 5,1 a 10
- 10,1 a 15
- 15,1 a 20
- 20,1 a 25
- acima de 25



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 84 - Potencial energético para biomassa de cana, cenário 1. - Fonte: IBGE, SIDRA

Cenário 02 - (60 kW/t)



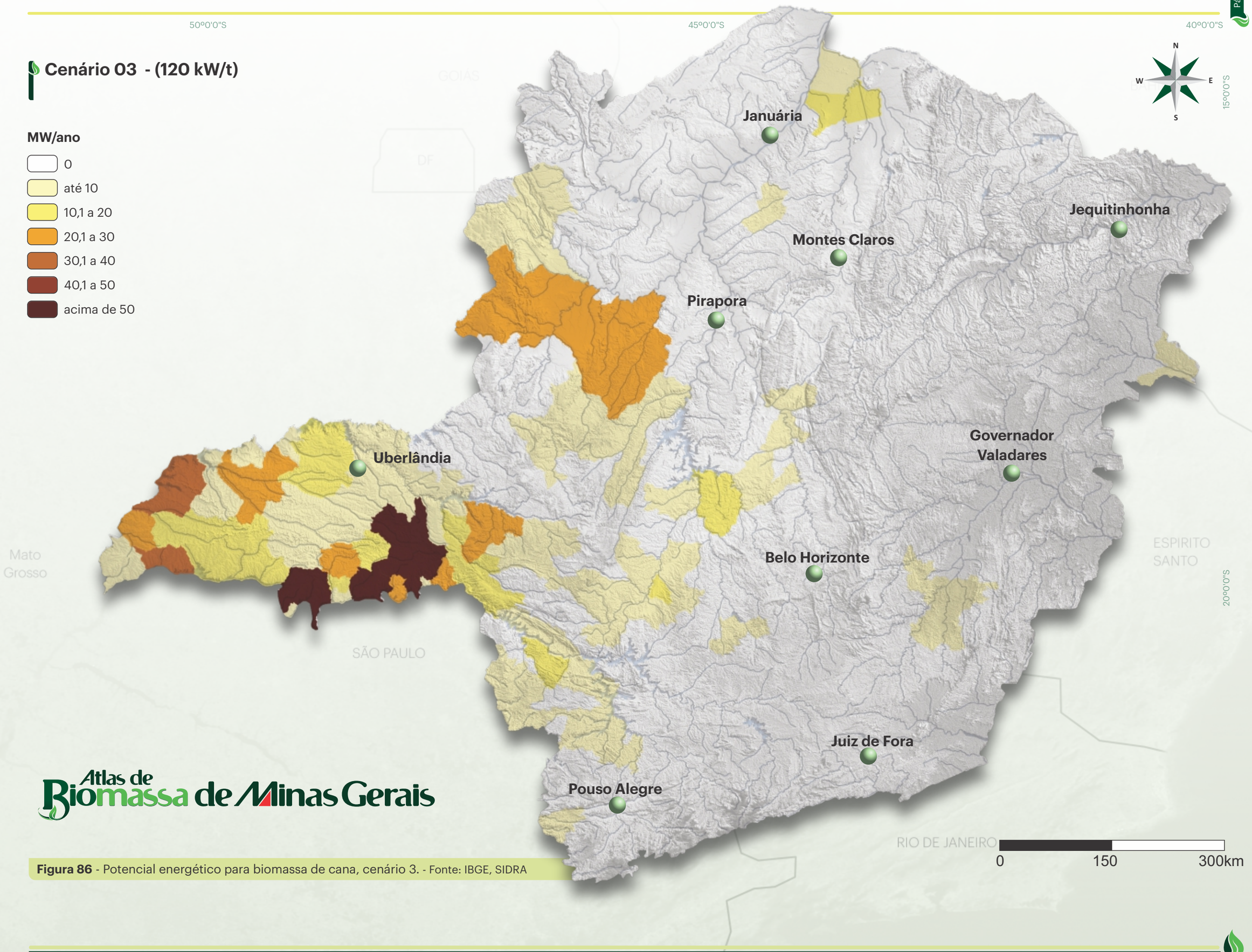
Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 85 - Potencial energético para biomassa de cana, cenário 2. - Fonte: IBGE, SIDRA

Cenário 03 - (120 kW/t)

MW/ano

- 0
- até 10
- 10,1 a 20
- 20,1 a 30
- 30,1 a 40
- 40,1 a 50
- acima de 50



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 86 - Potencial energético para biomassa de cana, cenário 3. - Fonte: IBGE, SIDRA

Potencial energético da biomassa

Vinhaça

Para a estimativa do potencial energético a partir da vinhaça, foi levado em consideração os valores das produções de cana, nos municípios de Minas Gerais no período de 2010 a 2015, os dados de plantio de cana e produção foram obtidos junto a SIAMIG (2017) e o IBGE (2015), respectivamente. Como a vinhaça é um subproduto da fabricação do etanol, considerou-se que 50% da produção de cana-de-açúcar em Minas Gerais foi destinada à produção de etanol e o restante para açúcar. Estes valores podem variar, dependendo da relação entre o preço do açúcar e do etanol a cada ano.

O potencial energético a partir da vinhaça é dado por (Adaptado de COELHO et al., 2016):

Equação 11

$$Potencial\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{cana} * F_{etanol} * F_{vinhaça} * DQO * \eta_1 * F_{biogás} * PCI * \eta_2}{8.760 * 860 * 1.000}$$

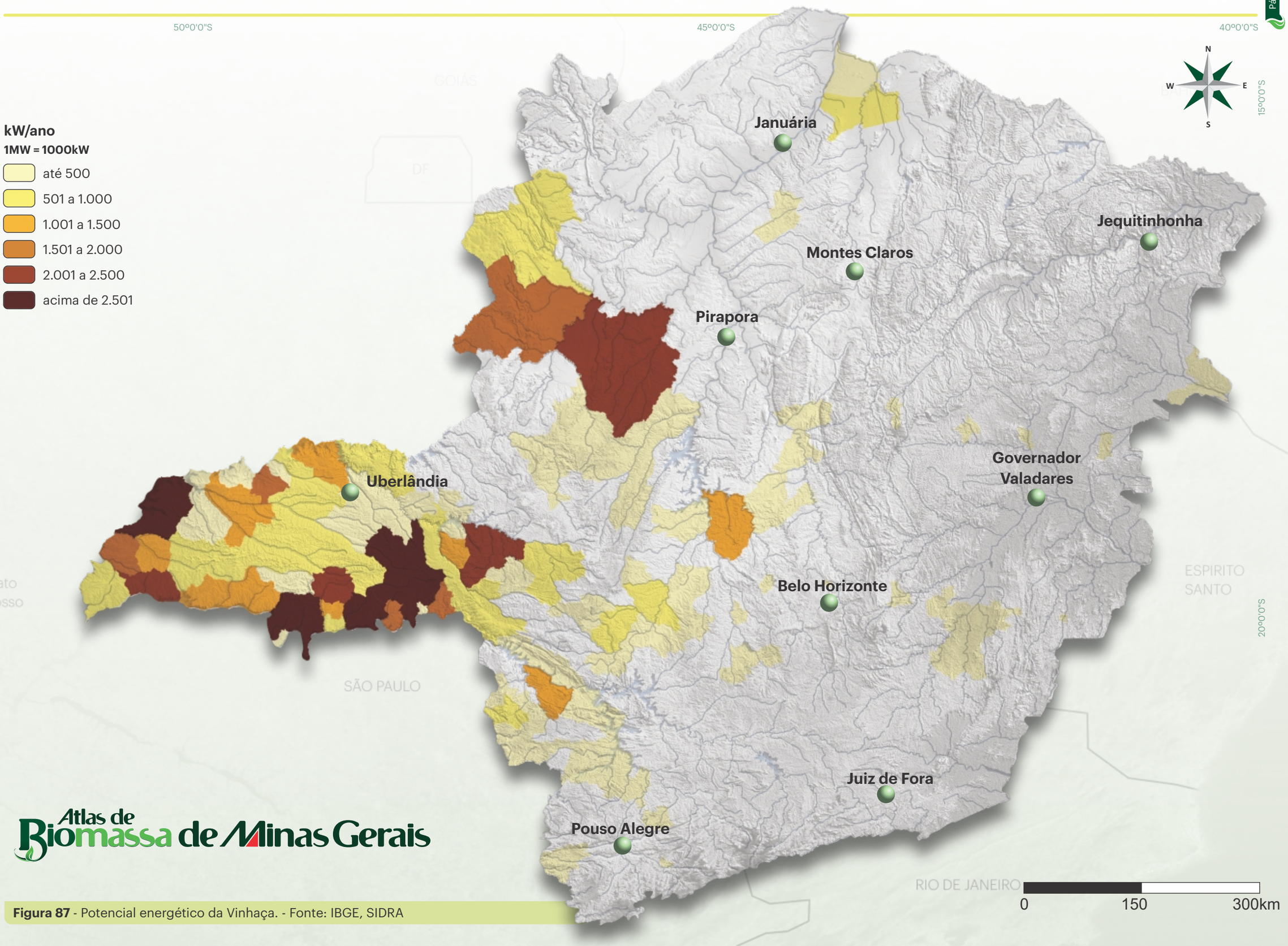
em que,
t_{cana} - produção de cana (toneladas por ano);
F_{etanol} - fator de conversão de tonelada de cana para litro de etanol;
$F_{vinhaça}$ - fator de conversão de litro de etanol para litro de vinhaça;
DQO - demanda química de oxigênio (kg/L) = 0,029 kg/L (SALOMON et al. 2007);
η_1 - eficiência de remoção de DQO = 0,717 (POMPERMAYER e PAULA, 2003);
$F_{Biogás}$ - fator de conversão de biogás por DQO removida (Nm³/kg);
PCI - Poder calorífico inferior = 5.100 kcal/Nm³.;
η_2 - eficiência da turbina - 35%;
860 - fator de conversão de kcal/m³ para kWh/m³.
1.000 - conversão de kW para MW.

A seguir, algumas variáveis da equação 11 são detalhadas:

F_{etanol} - fator de conversão de tonelada de cana para litro de etanol. Considerou-se o valor 80 litros de etanol por tonelada de cana-de-açúcar (CONAB, 2017);
$F_{vinhaça}$ - fator de conversão de litro de etanol para litro de vinhaça. A produção de vinhaça por litro de etanol é de 11,9 $L_{vinhaça}/L_{etanol}$ (ANDRADE, 2009);
$F_{Biogás}$ - utilizou-se valor de 0,45 Nm³/kg (LAMO, 1991).

A Figura 87 apresenta o potencial energético da vinhaça, considerando que 50% do cultivo de cana-de-açúcar é destinado a produção de etanol.

Irrigação com vinhaça. Fonte: Embrapa



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 87 - Potencial energético da Vinhaça. - Fonte: IBGE, SIDRA

4.4 - Potencial Energético do Milho

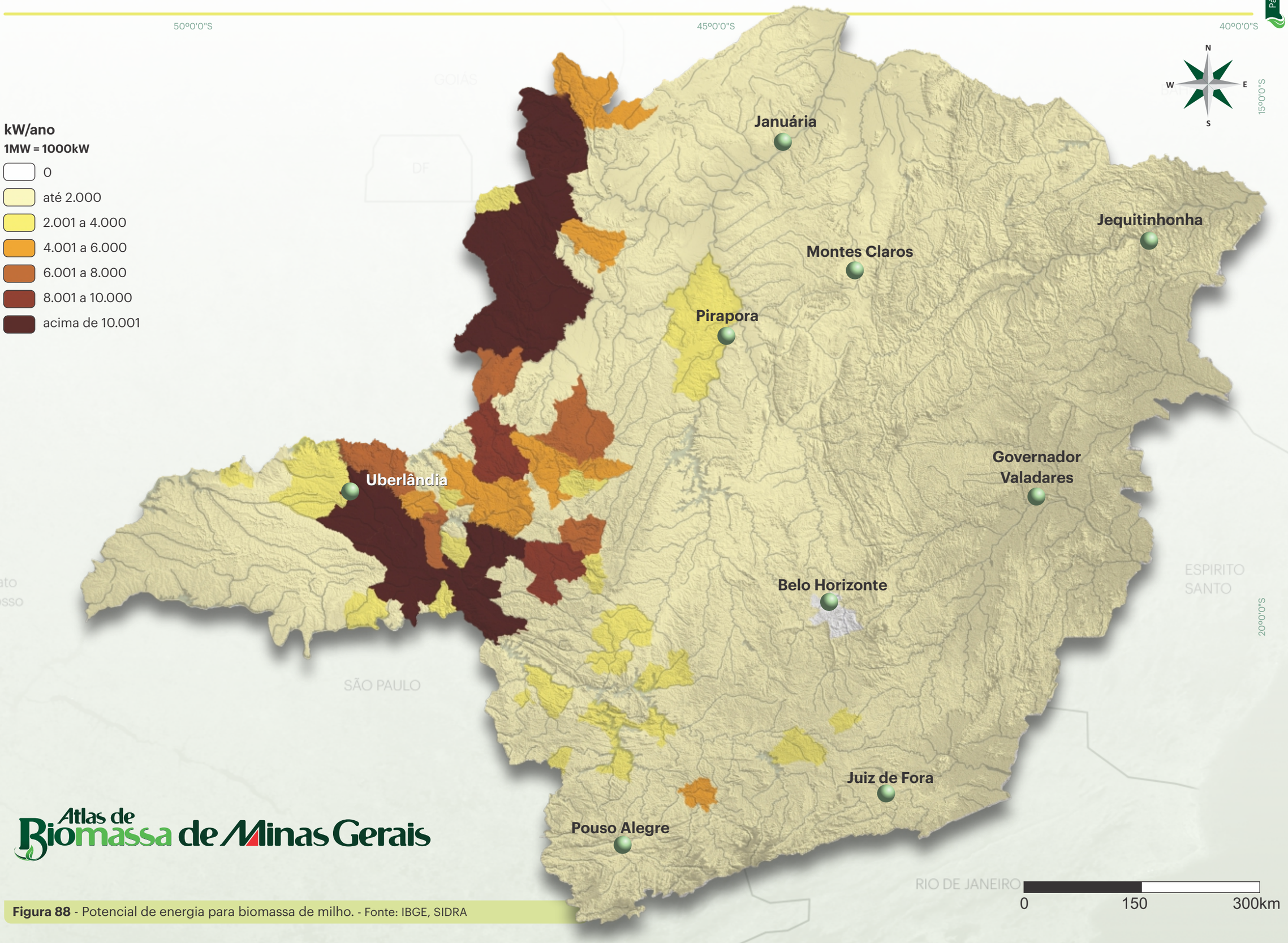
Para a estimativa do potencial energético a partir dos resíduos do milho, os valores das produções municipais de Minas Gerais foram obtidos junto ao IBGE, relativo aos anos de 2010 a 2015. A eficiência de conversão para os resíduos adotada foi de 15%, de baixo rendimento termodinâmico - sistemas compostos de caldeira de 20 bar, turbina de condensador atmosférico.

O dado apresentado pelo IBGE é em toneladas de milho produzido, portanto é necessário considerar somente o resíduo gerado que, neste caso, é de 2,2 toneladas de biomassa para cada tonelada de milho (KOOPMANS e KOPPEJAN, 1997). O poder calorífico útil considerado foi de 3.544,9 kcal/kg, com 11% de umidade. Será utilizado um fator de disponibilidade para coleta de 40%, ou seja, o restante deve permanecer no campo para garantir a sustentabilidade do processo. Considera-se que a geração de energia elétrica ocorra em 95% das horas anuais, correspondendo a 8322 horas. A conversão de kcal/kg para kWh/kg se dá pela divisão por 860 (EPE, 2014). O cálculo do potencial a partir desse resíduo foi efetuado pela equação 12 (FIGURA 88).

Equação 12

$$Potencial_{milho}\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{milho} * F_C * PCU * F_D * \eta}{8322 * 860}$$

em que,
t_{milho} - produção de milho (toneladas);
F_C - fator de conversão de tonelada de milho para tonelada de biomassa = 2,2;
PCU - poder calorífico útil a 11% de umidade = 3.544,9 (kcal/kg);
F_D - fator de disponibilidade para coleta 0,4;
η - eficiência de conversão = 0,15;
8322 - 95% das horas anuais;
860 - conversão de kcal/kg para kWh/kg.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 88 - Potencial de energia para biomassa de milho. - Fonte: IBGE, SIDRA

4.5 - Potencial Energético da Soja

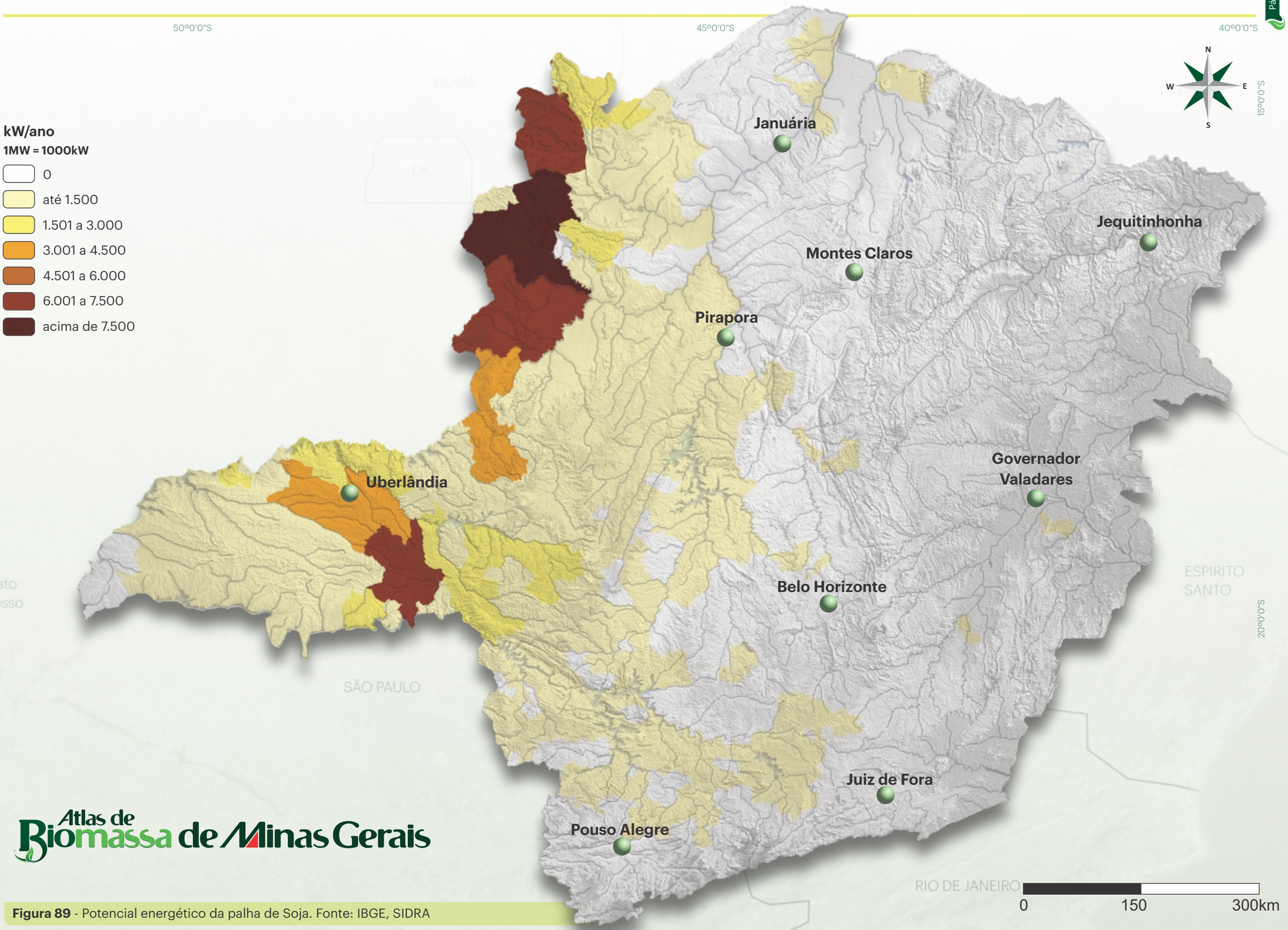
Carvalho (1992) apresenta uma relação palhada/peso do grão variando entre 120 a 150%. As palhas se caracterizam pela abundância e baixo custo relativo, embora apresentem baixo valor nutritivo, e teores de proteína, energia e minerais baixos (RESTLE et al, 2000). Devido aos carboidratos estruturais e fração indigerível alta este material possui altos teores de fibra (MARTIN, 1987; NUCCI, 1994).

A produção de soja, apresentada pelo IBGE é em toneladas do grão, portanto, é necessário considerar somente o resíduo gerado que, neste caso, é de 1,35 toneladas de biomassa para cada tonelada de soja (EPE, 2014). O poder calorífico útil considerado foi de 3.393,7 kcal/kg, com 11,5 % de umidade. Será utilizado um fator de disponibilidade para coleta de 30%, ou seja, o restante deve permanecer no campo para garantir a sustentabilidade do processo. Considera-se que a geração de energia elétrica ocorra em 95% das horas anuais, correspondendo a 8322 horas. A conversão de kcal/kg para kWh/kg se dá pela divisão por 860 (EPE, 2014). O potencial energético da palha de soja foi calculado com a metodologia do potencial energético do arroz, adaptada da metodologia CENBIO (2012), conforme equação 13 (FIGURA 89).

Equação 13

$$Potencial\left(\frac{MW}{ano}\right)_{soja} = \frac{t_{soja} * F_C * PCU * F_D * \eta}{8322 * 860}$$

em que,
t_{soja} - produção de soja (toneladas);
F_C - fator de conversão de tonelada de soja para tonelada de biomassa = 1,35;
PCU - poder calorífico útil a 11,5% de umidade = 3.393,7 (kcal/kg);
F_D - fator de disponibilidade para coleta = 0,3;
η - eficiência de conversão = 0,15;
8322 - 95% das horas anuais;
860 - conversão de kcal/kg para kWh/kg.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 89 - Potencial energético da palha de Soja. Fonte: IBGE, SIDRA

4.6 - Potencial Energético dos Vegetais Lenhosos

Além do carvão vegetal e seus co-produtos, Minas Gerais também apresenta um grande potencial para geração de energia térmica e elétrica a partir da madeira de eucalipto, conforme reportado no estudo realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), em 2014, em parceria com o Governo de Minas Gerais. Neste estudo estimou-se os potenciais teóricos e técnicos do eucalipto para a geração de energia. Para o potencial teórico, considerou-se toda área plantada de Eucalipto no estado de Minas Gerais, em 2012, como sendo fonte de energia fisicamente disponível, enquanto para o estudo do potencial técnico foram utilizados dados como eficiência de conversão, ciclo de corte e incremento médio dos gêneros de Eucalipto a cada ano.

Considerando os dados consolidados de área total ocupada com floresta de eucalipto (1,4 milhões de hectares) em 2015, estima-se um potencial teórico e técnico no estado de Minas Gerais de aproximadamente 501.965,86, e 3.582,62, conforme apresentado na Tabela 40.

Potencial energético (GWh) das florestas de Eucalipto no estado de Minas Gerais - 2016	
Teórico	501.965,86
Técnico	3.582,62

Tabela 40 - Potencial energético (GWh) das florestas de Eucalipto no estado de Minas Gerais - 2016. Fonte: FEAM, 2014.

A geração de energia a partir de resíduos madeireiro é uma alternativa atrativa para viabilizar os projetos a partir de biomassa. Na Figura 90 é apresentado o potencial energético do resíduo da tora da madeira de eucalipto considerando dois cenários, ou seja, o cálculo do potencial para geração de energia levando em conta o sistema convencional de turbina a vapor com dois rendimentos: de pequeno porte, 15% de eficiência (potenciais entre 200 kW/ano e 10 MW/ano) e médio porte de 30% de eficiência (potenciais maiores do que 10 MW/ano).

Para as estimativas dos potenciais, considerou-se um teor de umidade de 25%, poder calorífico útil de 3.017,3 kcal/kg e 500 kg/m³ para a densidade aparente. A conversão de kcal/kg para kWh/kg foi dada pela divisão por 860 (EQUAÇÂO 14). Também, considerou-se, um rendimento na serraria de 50%, ou seja, tem-se a geração de 50% de resíduos, conforme dados estabelecidos pelo IBGE que correspondem à madeira em tora já processada, logo o resíduo é o resultante de seu processamento. A fase anterior de campo e moveleira não foram consideradas por se tratarem de locais distantes e indefinidos.

Em ambos os cenários foram considerados que o sistema opere durante todo o ano, por meio dos resíduos gerados e que a operação ocorra em 95% das horas anuais, 8322 horas de operação por ano.

Equação 14

$$Potencial_{tora\ de\ eucalipto}\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{eucalipto} * F_C * PCU * \eta * \rho}{8322 * 860}$$

em que,
$t_{eucalipto}$ - produção de eucalipto (m³);
F_C - fator de conversão de tonelada de eucalipto para tonelada de biomassa = para madeira em tora = 0,5 para florestas energéticas = 1.
PCU - poder calorífico útil a 25% de umidade = 3.017,7 (kcal/kg);
η - eficiência de conversão, para potenciais acima de 200kW/ano e menores que 10 MW/ano = 15. Para potenciais maiores do que 10MW/ano = 0,3;
ρ - densidade eucalipto = 0,5 tonelada/m³;
8.322 - 95% das horas anuais;
860 - conversão de kcal/kg para kWh/kg.

Potencial instalado

Segundo dados do banco de informações da ANEEL (2017):

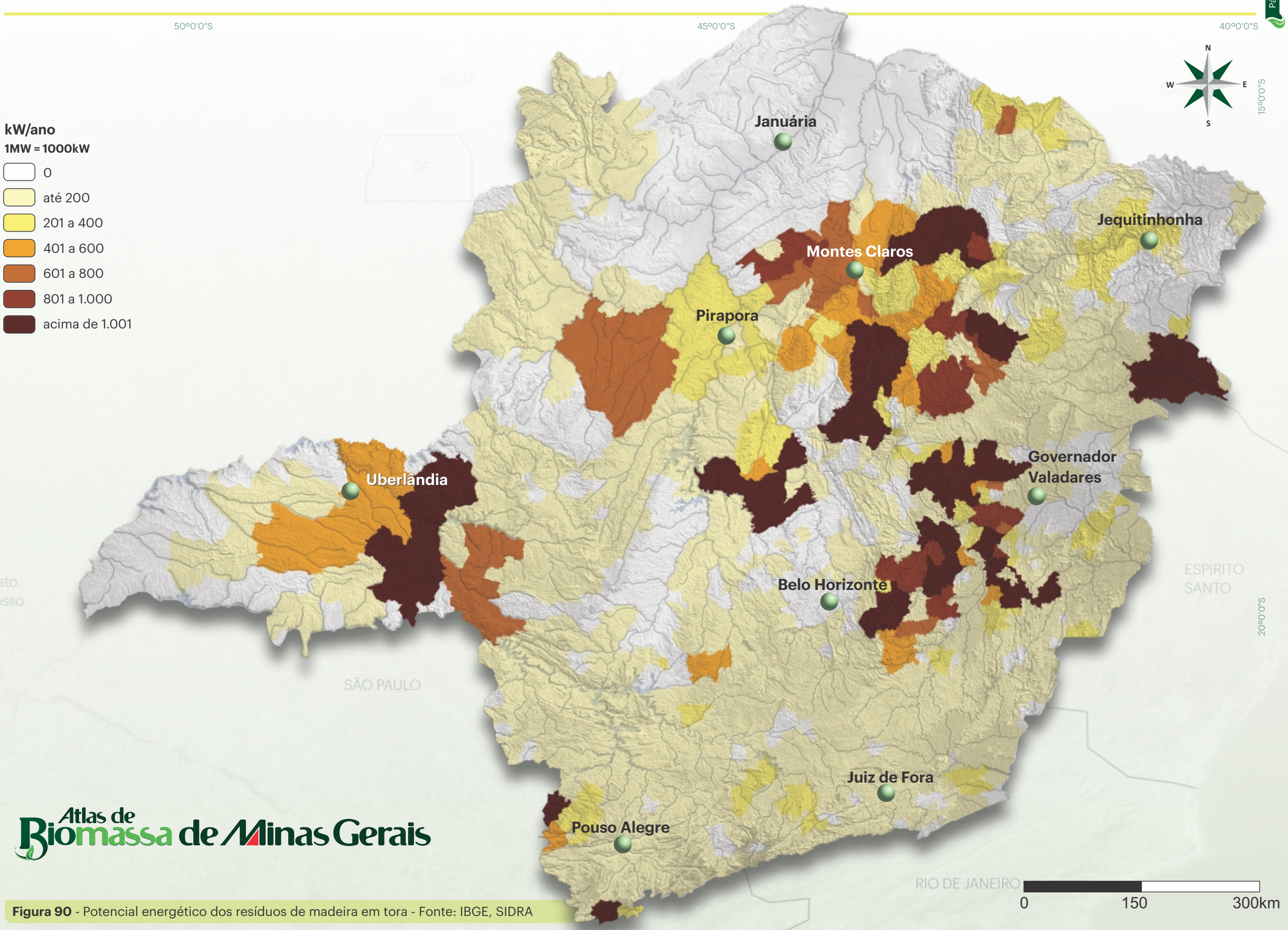
- A biomassa florestal correspondeu por aproximadamente 1,92% do total de energia elétrica gerada no ano de 2015. Essa energia provem do carvão vegetal, gás de alto forno, lenha, licor negro, e resíduos florestais, de um total de 88 usinas gerando 3.048.673 kW.

- A capacidade instalada de geração de energia elétrica a partir de biomassa no ano de 2015 foi de 13.257,00 MW, e deste 51 MW foram do carvão vegetal, 112 MW de gás de alto forno, 1.923 MW do licor negro e 400 MW de resíduos florestais (BEN, 2016).

- O estado de Minas Gerais possui atualmente 421 usinas termoelétricas em operação gerando 15,27% do total de energia gerada no estado, e destas, 3 são a carvão vegetal, 7 a gás de alto forno (biomassa) e 4 a gás de alto forno (CM). A potência total das termoelétricas está em torno de 2.412.666 kW. A Tabela 41 mostra as usinas termoelétricas a carvão vegetal, em operação em Minas Gerais.

Usina	Data Operação	Potência Fiscalizada [kW]	Destino da Energia	Proprietário	Município	Fonte
Barreiro	21-01-2004	12.900	PIE	100% para Usina Termelétrica Barreiro S.A	Belo Horizonte MG	Carvão vegetal
Usipar Indústria e Comercio	02-01-2007	4.997	REG	100% para Usipar Indústria e Comercio Ltda - EPP	Pitangui MG	Carvão Vegetal
AVG I-II	01-09-2009	4.800	REG	100% para AVG Energética S.A.	Sete Lagoas MG	Carvão Vegetal

Tabela 41 - Usinas termoelétricas, carvão vegetal, em operação em Minas Gerais. - Fonte: Banco de informações da ANEEL (2017).



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 90 - Potencial energético dos resíduos de madeira em tora - Fonte: IBGE, SIDRA

4.7 - Potencial Energético Resíduos Sólidos Urbanos

Os sistemas de tratamento de RSU podem ser classificados em sistemas mecânicos, biológicos e térmicos (incluindo pirólise, incineração e gaseificação). No entanto, a incineração e o processamento biológico são as duas principais formas de produzir energia elétrica a partir dos RSU. A ênfase será dada nos processos biológicos, forma de tratamento mais usualmente empregada no Brasil e em Minas Gerais. As tecnologias mais conhecidas de tratamento de resíduos com aproveitamento energético são decorrentes da utilização do biogás produzido em reatores anaeróbios ou da captura do mesmo em aterros sanitários. Os microrganismos responsáveis por esse processo transformam os resíduos orgânicos em substâncias mais estáveis na forma de gás, composto por dióxido de carbono (CO_2), água, metano (CH_4), gás sulfídrico (H_2S) e outros componentes, sendo o metano, o gás de principal interesse para aproveitamento energético.

O processo biológico responsável pela geração de biogás é chamado de digestão anaeróbia e pode ocorrer no próprio aterro sanitário sob condições de ausência de oxigênio. Em um aterro sanitário, os RSU são dispostos de maneira ambientalmente correta sob critérios de engenharia que minimizam os efeitos deletérios ao ambiente. Assim, a fração orgânica, após a disposição, é coberta por camadas de material inerte, havendo ainda drenos para a coleta dos gases gerados, além da coleta e tratamento dos lixiviados líquido.

A utilização do biogás pode ser objeto de projetos que visem ter como recompensa financeira a comercialização de créditos de carbono em mercados voluntários ou Reduções Certificadas de Emissão do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, conforme previsto no Protocolo de Quioto.

O cálculo do potencial de produção de metano a partir da disposição de resíduos sólidos municipais foi baseado na metodologia recomendada pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC (IPCC, 1996), mediante a seguinte equação 15:

Equação 15

$$Metano\left(\frac{ton\ CH_4}{ano}\right) = RSU_t * FMC * COD * COD_f * F * \frac{4}{3} - R) * (1 - OX)$$

em que,
RSU_t - total de RSU coletado (tonelada por ano);
FMC - Fator de correção de metano;
COD - Carbono orgânico degradável no RSU (fração);
COD_f - Fração de COD que realmente degrada;
F - Fração de metano no biogás;
R - CH_4 recuperado (ton/ano);
OX - Fator de oxidação.

As variáveis da equação 15 são detalhadas a seguir:

- Cálculo do total de RSU coletado (RSUt): valor de RSU coletado por habitante que, segundo ABRELPE (2015), a quantidade coletada para o estado de Minas Gerais foi de 0,838 kg/hab.dia. Para se chegar ao valor total, basta multiplicar pela população do município e o período de 365 dias, correspondendo ao valor anual.

- Cálculo do Fator de Correção de Metano (FCM): o IPCC recomenda valores de FCM de acordo com a profundidade do local de disposição de resíduos sólidos. Um desses valores é 60% para os locais sem classificação. Uma vez que não se conhece a profundidade dos locais de disposição de resíduos sólidos no estado de Minas Gerais, será utilizado o valor de 60% para todos os municípios.

- Cálculo do Carbono Orgânico Degradável (COD): o valor do carbono orgânico degradável utilizado nesse panorama foi o sugerido pelo IPCC, igual a 12%, valor que não leva em consideração a composição de resíduos no estado, pois os dados de composição, nas diferentes cidades de Minas Gerais, são escassos.

- Cálculo da fração de COD que Realmente Degrada (CODf): foi utilizado nesse panorama, conforme recomendado pelo IPCC (1996), o valor de 77%, correspondente à fração de COD que realmente degrada.

- Cálculo da Fração de Metano no Biogás (F): o IPCC recomenda que se considere a fração de gás metano no biogás de aterro da ordem de 50%.

- Cálculo da Quantidade de Metano Recuperado (R): a quantidade de metano recuperado é considerada insignificante.

- Cálculo do Fator de Oxidação (OX): o fator de oxidação é considerado zero.

É necessário salientar que a geração de metano a partir da disposição de resíduos sólidos sofre variações ao longo do tempo, conforme aumenta-se ou diminui-se a disposição de matéria orgânica. Sendo assim, a equação 15 refere-se ao potencial de metano gerado ao longo de um ano de disposição, não considerando o metano que possa já estar sendo emitido a partir do resíduo depositado anteriormente. A quantidade de metano emitida poderá aumentar conforme o aumento da quantidade de RSU no aterro com o passar do tempo, pois a curva de geração de metano tem um comportamento crescente durante o período em que o aterro recebe os resíduos. A cada nova tonelada de lixo depositada, soma-se um novo potencial de geração de biogás. O ponto máximo da curva ocorre no último ano de disposição do lixo no aterro e a partir daí a curva é regida pela constante de decaimento, referente à degradação da matéria orgânica no tempo (CENBIO, 2012).

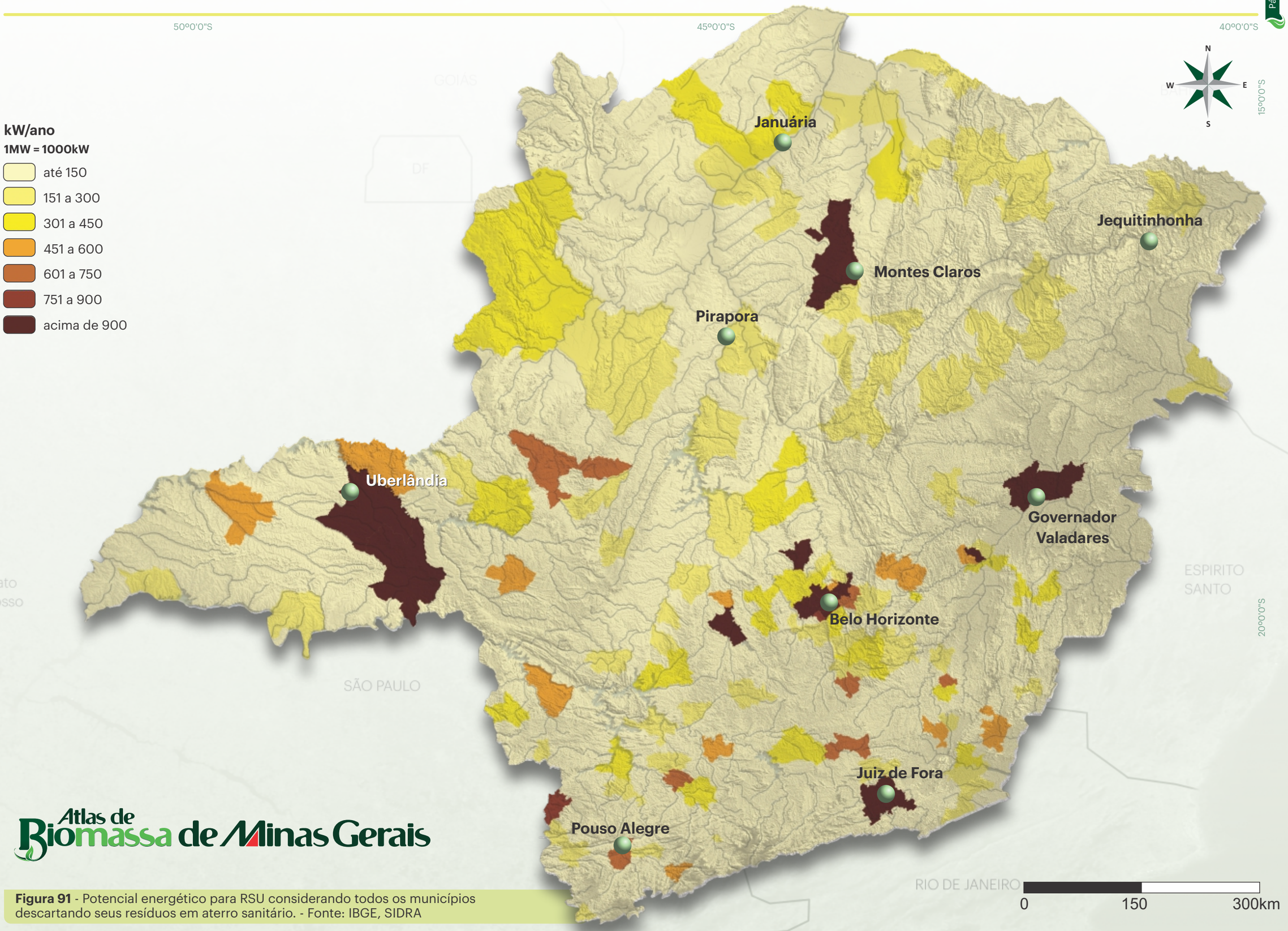
Considerando o poder calorífico inferior (PCI) do gás metano 8.604 kcal/m³, podemos estimar o potencial energético dos RSU destinados em aterros sanitários. O biogás pode ser queimado na atmosfera ou ter aproveitamento energético. Queimando esse gás é possível converter, a partir de ciclo de potência, o calor gerado pela queima do mesmo em energia elétrica, como demonstrado pela equação 16.

Equação 16

$$Potencial\ RSU\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{metano} * 1.000 * PCI * \eta}{\rho * 8322 * 860}$$

em que,
t_{metano} - quantidade de metano gerada no ano, obtida na equação 15 (tonelada);
1.000 - Conversão de tonelada para kg;
PCI - Poder calórico inferior = 8.604 kcal/m³;
η - Eficiência de conversão = 0,28;
ρ - Densidade do metano = 0,74 kg/m³;
8760 = considera-se funcionamento durante todo o ano;
860 = fator de conversão de kcal/kg para kWh/kg.

A Figura 91 apresenta o potencial de energia elétrica gerado a partir do RSU, considerando todos os municípios de Minas Gerais possuindo aterro sanitário. Como é previsto pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Lei n° 12.305/10, em que os municípios devem realizar uma disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 91 - Potencial energético para RSU considerando todos os municípios descartando seus resíduos em aterro sanitário. - Fonte: IBGE, SIDRA

4.8 - Potencial Energético Efluentes Líquidos Domésticos

A indústria de tratamento de efluentes não necessariamente preocupa-se em aliar eficiência energética com eficiência de remoção de poluentes. O setor de saneamento possui demanda considerável de energia, sendo equivalente a aproximadamente 2,6% da demanda energética do Brasil (BEN, 2008).

Segundo Fritz et al. (2011), os lodos de efluentes industriais e domésticos são considerados biomassa de alto poder calorífico, quando possuem baixa umidade, e são essencialmente de origem orgânica. Na Tabela 42 são apresentados valores típicos do poder calorífico de diferentes tipos de lodo oriundos de efluentes domésticos.

Tipo de lodo	Poder calorífico (kJ/kg peso seco)
Lodo bruto primário	23.300 - 29.000
Lodo digerido anaeróbio	12.793
Lodo ativado	19.770-23.300

Tabela 42 - Poder calorífico de diferentes tipos de lodo de esgoto. - Fonte: Adaptado de Luduvice e Fernandes (2001).

De uma forma geral, elevados teores de carbono e hidrogênio, além de reduzidos conteúdos de umidade e oxigênio contribuem para um poder calorífico maior. Nesse sentido, lodos de ETE submetidos a processos térmicos ou de secagem garantem elevados poderes caloríficos, inclusive superiores ao da madeira, como apresentado por Fonts et al. (2009). Considerando o balanço energético de todo o processo, ressalta-se a importância do desenvolvimento e utilização de técnicas de secagem com reduzida demanda de energia, como a secagem utilizando energia solar, por exemplo.

O aproveitamento energético do lodo pode ser realizado por meio de processos termoquímicos e/ou bioquímicos. Nos processos termoquímicos, o material orgânico presente no lodo é degradado sob condições controladas de temperatura, pressão e teor de oxigênio. Os processos térmicos mais comuns são a pirólise, a gaseificação e a combustão/incineração. Em todas essas alternativas pode-se obter uma expressiva redução do volume e da massa de resíduos finais, além da prevenção de odores e eliminação da biodegradabilidade e do potencial de formação de metano e chorume nos aterros sanitários. Para esses processos existe a necessidade de secagem e/ou desidratação do lodo, o que vai elevar o poder calorífico (WERLE e WILK, 2010). Dentre os processos bioquímicos, destaca-se a digestão anaeróbia. O biogás, gerado por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica contida em efluentes e resíduos domésticos, industriais e agropecuários, caracteriza-se como uma fonte alternativa e renovável de energia cada vez mais utilizada em todo o mundo. No Brasil, o elevado índice populacional, sua convergência em grandes centros urbanos e a elevada produção agropecuária e agroindustrial comprovam um considerável potencial de produção de biogás.

O cálculo do potencial de produção de metano a partir do aproveitamento energético dos resíduos de ETEs foi realizado considerando que cada habitante de Minas Gerais produz 150 litros de esgoto tratado por dia (COPASA, 2017), logo esse efluente poderá ser tratado através de digestão anaeróbia para geração de metano, mediante a equação 17:

Equação 17

$$Metano\left(\frac{ton\ CH_4}{ano}\right) = (Pop\ x\ ET\ x\ DBO_5\ x\ \eta\ x\ MFEM) - R$$

em que,
Pop - População da cidade (habitantes);
ET - Efluente tratado (m³/hab. ano);
DBO_5 - taxa de geração de demanda bioquímica de oxigênio (ton DBO_5/m³);
η - eficiência do reator responsável pelo processo de digestão anaeróbica;
MFEM - máximo fator de emissão de metano (fração adimensional);
R - Quantidade de metano recuperado (kg CH_4/ano).

A seguir cada variável da equação 17 é detalhada:

- ET – efluente tratado (m³/hab.ano)

Foi considerado o valor de 0,150 m³/ hab.dia de efluente tratado, segundo COPASA (2017).

- Cálculo da Taxa de Demanda Bioquímica de Oxigênio - Taxa DBO_5

A geração de carga orgânica para a população do Brasil, segundo Feachem (1983), equivale a 0,05 kgDBO_5 por habitante por dia. Segundo a norma ABNT NBR 7229/93 são utilizados, aproximadamente, 160 litros de água por dia por habitante nas regiões urbanas, o que equivale a 0,312 kgDBO_5/m³ de esgoto gerado. Para os cálculos foi considerado o valor em toneladas de 0,000312 tonDBO_5/m³.

- Cálculo da Eficiência do Biodigestor

Adotou-se uma eficiência de 50% para os biodigestores anaeróbios com base na eficiência média desses equipamentos.

- Cálculo do Máximo Fator de Emissão de Metano - MFEM

O valor assumido para o máximo fator de emissão de metano é igual ao valor sugerido pelo *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC) de 0,25 tCH_4 por tonelada de DBO_5.

- Cálculo da Quantidade de metano recuperado - R

A quantidade de metano recuperado é considerada insignificante.

Considerando o poder calorífico inferior (PCI) do gás metano 8.604 kcal/m³, podemos estimar o potencial energético do lodo gerado nas ETEs. O biogás pode ser queimado na atmosfera ou ter aproveitamento energético. Queimando esse gás é possível converter, a partir de ciclo de potência, o calor gerado pela queima do mesmo em energia elétrica, como demonstrado pela equação 18.

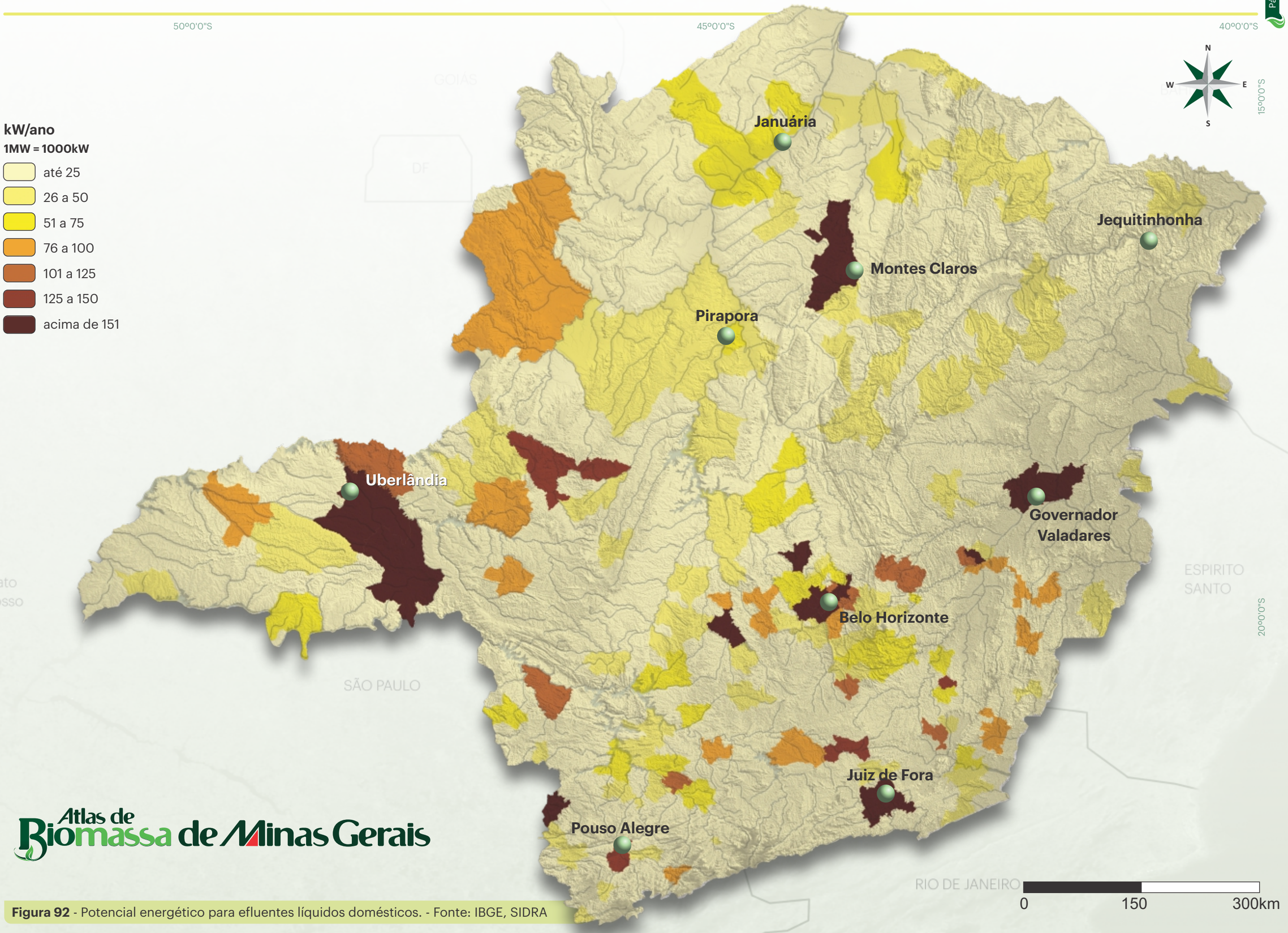
Equação 18

$$Potencial\ lodo\ de\ esgoto\left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{metano}*1.000*PCI*\eta}{\rho*8322*860}$$

em que,
t_{metano} - quantidade de metano gerada no ano, obtida na equação 17 (tonelada);
1.000 - Conversão de tonelada para kg;
PCI - Poder calórico inferior = 8.604 kcal/m³;
η - Eficiência de conversão = 0,28;
ρ - Densidade do metano = 0,74 kg/m³;
8760 = considera-se funcionamento durante todo o ano;
860 = fator de conversão de kcal/kg para kWh/kg.

Além da geração de biocombustíveis, existem outras formas de aproveitamento do lodo, tanto na indústria (fabricação de tijolos e cerâmicas; produção de agregado leve para construção civil; produção de cimento) quanto na agricultura (fertilizante orgânico e compostagem; recuperação de solos degradados). O uso do lodo (rico em matéria orgânica) na agricultura tem sua destinação mais nobre para a produção de fertilizantes orgânicos tendo em vista os nutrientes (nitrogênio, fósforo e matéria orgânica) presentes em sua composição que tendem a aumentar a fertilidade dos solos (FONTS et al., 2012).

A Figura 92 apresenta o potencial energético para os efluentes líquidos domésticos.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 92 - Potencial energético para efluentes líquidos domésticos. - Fonte: IBGE, SIDRA

4.9 - Potencial Energético Efluentes Líquidos Animais

Para a determinação do potencial de geração de energia elétrica do biogás produzido a partir dos resíduos animais utilizou-se, dados do IBGE para determinar quantidade de animais por município do estado de Minas Gerais, entre os anos de 2010 a 2015.

A equação para o cálculo da estimativa da produção de biogás apresenta dados de entrada que permitem obter o potencial energético para os dejetos de bovinos, suínos e aves (CENBIO, 2012). A partir dos dados da Tabela 43 e da Equação 19, calculou-se o potencial de produção de metano dos resíduos.

Origem	kg esterco/dia Unidade Geradora (Et)	kg biogás/kg de esterco (Pb)	Concentração de Metano % (CH_4)
Suínos	2,25	0,062	66
Bovinos	10	0,037	60
Aves	0,18	0,055	60

Tabela 43 - Valores de conversão energética para os efluentes suínos, bovinos e de aves. - Fonte Motta, 1986.

Equação 19

$$m^3\ Metano = 365\ dias * N_{animais} * Et * Pb * CH_4 * VE^{-1}$$

em que,
$N_{animais}$ - número de animais;
Et - esterco total (kg esterco/dia.unidade geradora), Tabela 43;
Pb - produção de biogás (kg biogás/kg de esterco) Tabela 43;
CH_4 - concentração de metano no biogás (%), Tabela 43;
VE^{-1} - volume específico do metano = 0,670 kg CH_4/m^3CH_4.

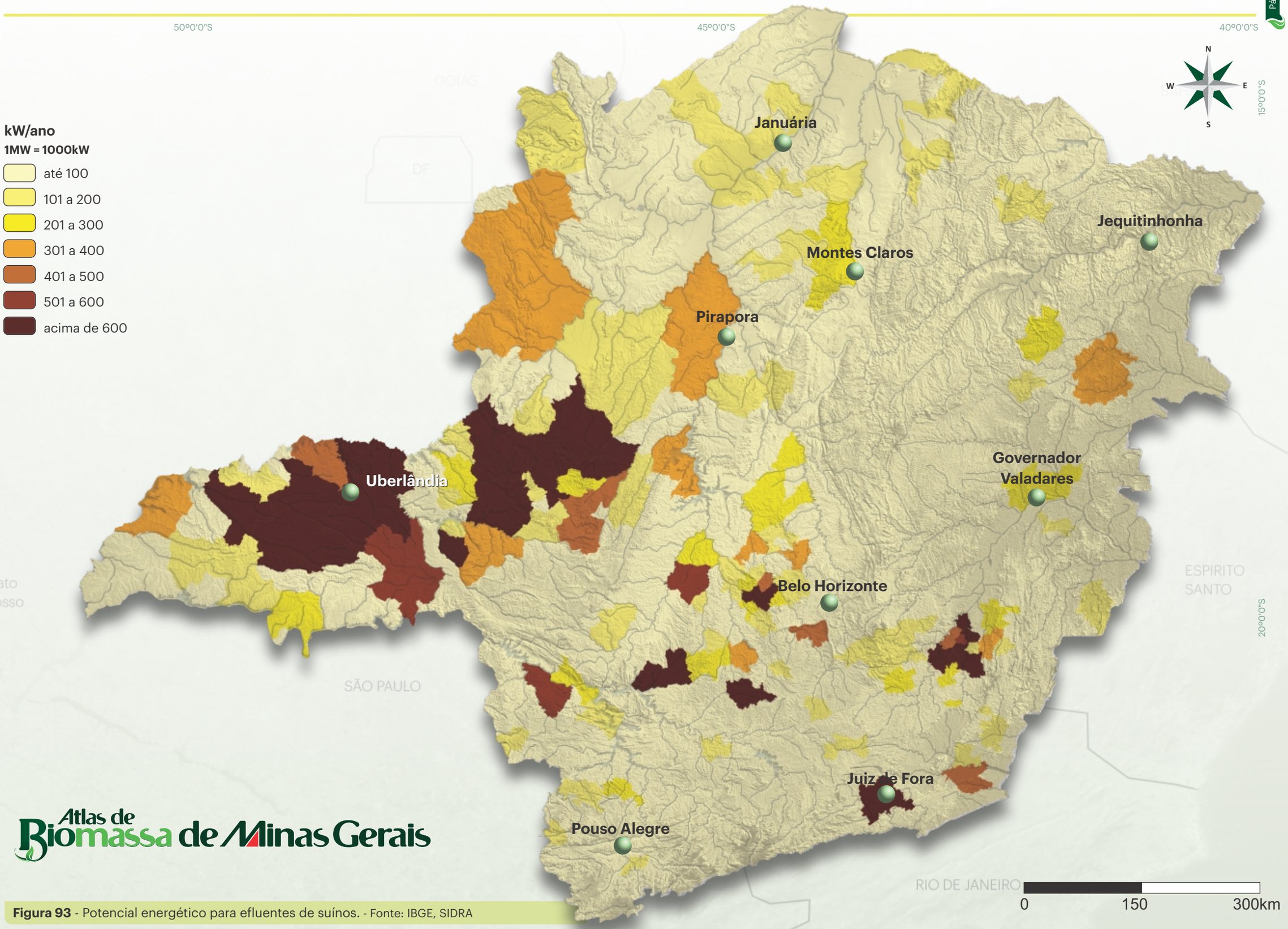
Considerando o poder calorífico inferior (PCI) do gás metano 8.604 kcal/m³, podemos estimar o potencial energético dos efluentes líquidos animais. O biogás pode ser queimado na atmosfera ou ter aproveitamento energético. Queimando esse gás é possível converter, a partir de ciclo de potência, o calor gerado pela queima do mesmo em energia elétrica, como demonstrado pela equação 20.

Equação 20

$$Potencial\ efluentes\ animais\ \left(\frac{MW}{ano}\right) = \frac{t_{metano} * 1.000 * PCI * \eta}{\rho * 8322 * 860}$$

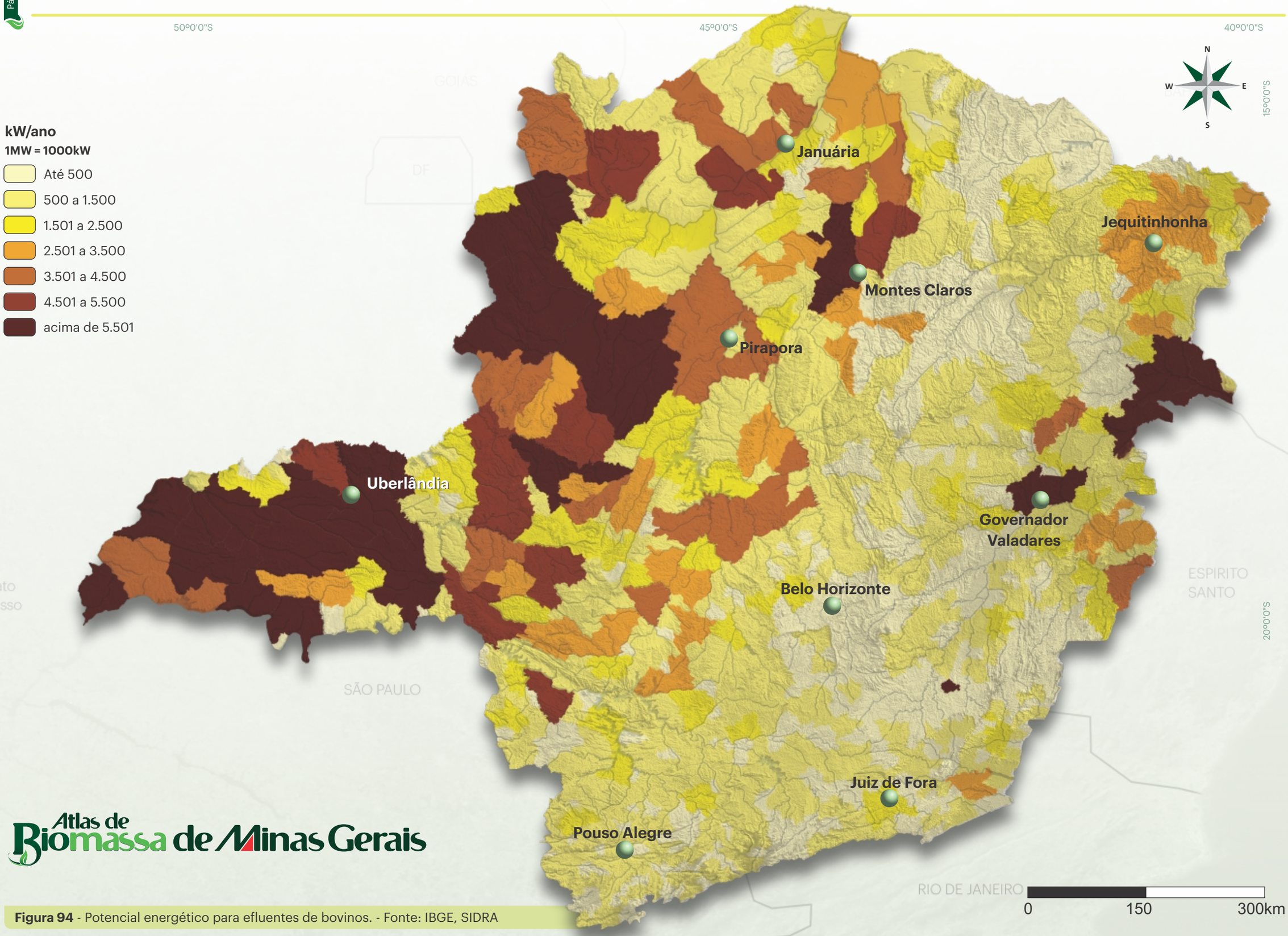
em que,
t_{metano} - quantidade de metano gerada no ano, obtida na equação 19 (tonelada);
1.000 - Conversão de tonelada para kg;
PCI - Poder calórico inferior = 8.604 kcal/m³;
η - Eficiência de conversão = 0,28;
ρ - Densidade do metano = 0,74 kg/m³;
8760 = considera-se funcionamento durante todo o ano;
860 = fator de conversão de kcal/kg para kWh/kg.

As Figuras 93, 94 e 95 apresentam o potencial energético de efluentes líquidos para suínos, bovinos e aves, respectivamente.



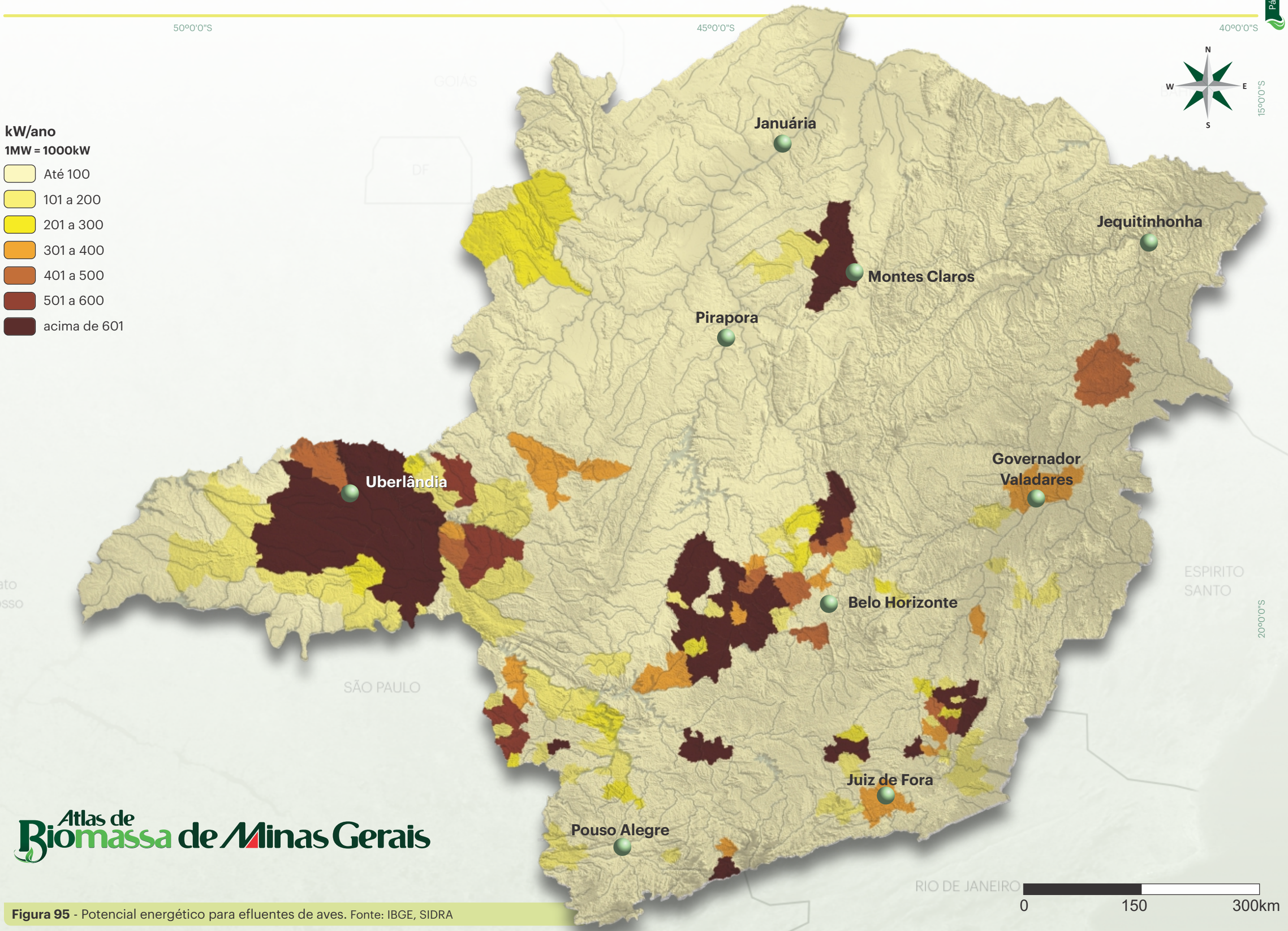
Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 93 - Potencial energético para efluentes de suínos. - Fonte: IBGE, SIDRA



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 94 - Potencial energético para efluentes de bovinos. - Fonte: IBGE, SIDRA



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 95 - Potencial energético para efluentes de aves. Fonte: IBGE, SIDRA

Capítulo 5

5 - Fechamento e Conclusões

5.1 Desafios

5.2 Perspectivas

Fechamento e conclusões

Ao longo da última década, os resíduos agroindustriais tornaram-se importante fonte renovável de energia limpa. Entretanto, um ponto decisivo para o futuro do setor de bioenergia é saber como o crescimento da produção e utilização da biomassa para geração de eletricidade poderá afetar a produção de alimentos, a biodiversidade, a conservação dos solos e da natureza e os projetos para sequestro de carbono. Há, ainda, uma grande incerteza acerca tanto da disponibilidade futura de terras para a expansão das lavouras energéticas quanto da produtividade regional de biomassa. Saber até onde se pode avançar na produção de bioenergia é imprescindível para que esta seja, de fato, uma opção atrativa, economicamente viável, ambientalmente sustentável e socialmente desejável, para mitigar os efeitos das emissões de gases efeito-estufa, associados às atuais matrizes energéticas, no aquecimento global e nas mudanças climáticas.

As principais fontes de biomassa energética podem ser agrupadas nas seguintes categorias: I) resíduos agrícolas, produzidos na colheita das lavouras e pelas indústrias agropecuárias; II) resíduos florestais, oriundos das indústrias madeireiras e da exploração das florestas; III) cultivos energéticos – árvores e lavouras integralmente destinadas à produção de energia; e IV) resíduos sólidos urbanos. Apesar da multitude de fontes e de tecnologias para sua conversão, a participação da biomassa como energia limpa renovável nas matrizes energéticas regionais do Brasil ainda é bastante reduzida.

Uma parcela substancial de pesquisas recentes deste setor tem se concentrado no aprimoramento das estimativas do potencial e dos níveis produção dos plantios energéticos (TENERELLI e MONTELEONE, 2008; VOIVONTAS et al., 2001). A elevada dispersão geográfica do potencial de produção de biomassa impõe a utilização dos sistemas de informações geográficas em estudos acerca da distribuição espacial da oferta de biomassa, das estimativas do custo de seu transporte até as usinas existentes e da seleção de locais mais promissores para a implantação de novos cultivos energéticos (COSTA, 2014; TEIXEIRA, 2016).

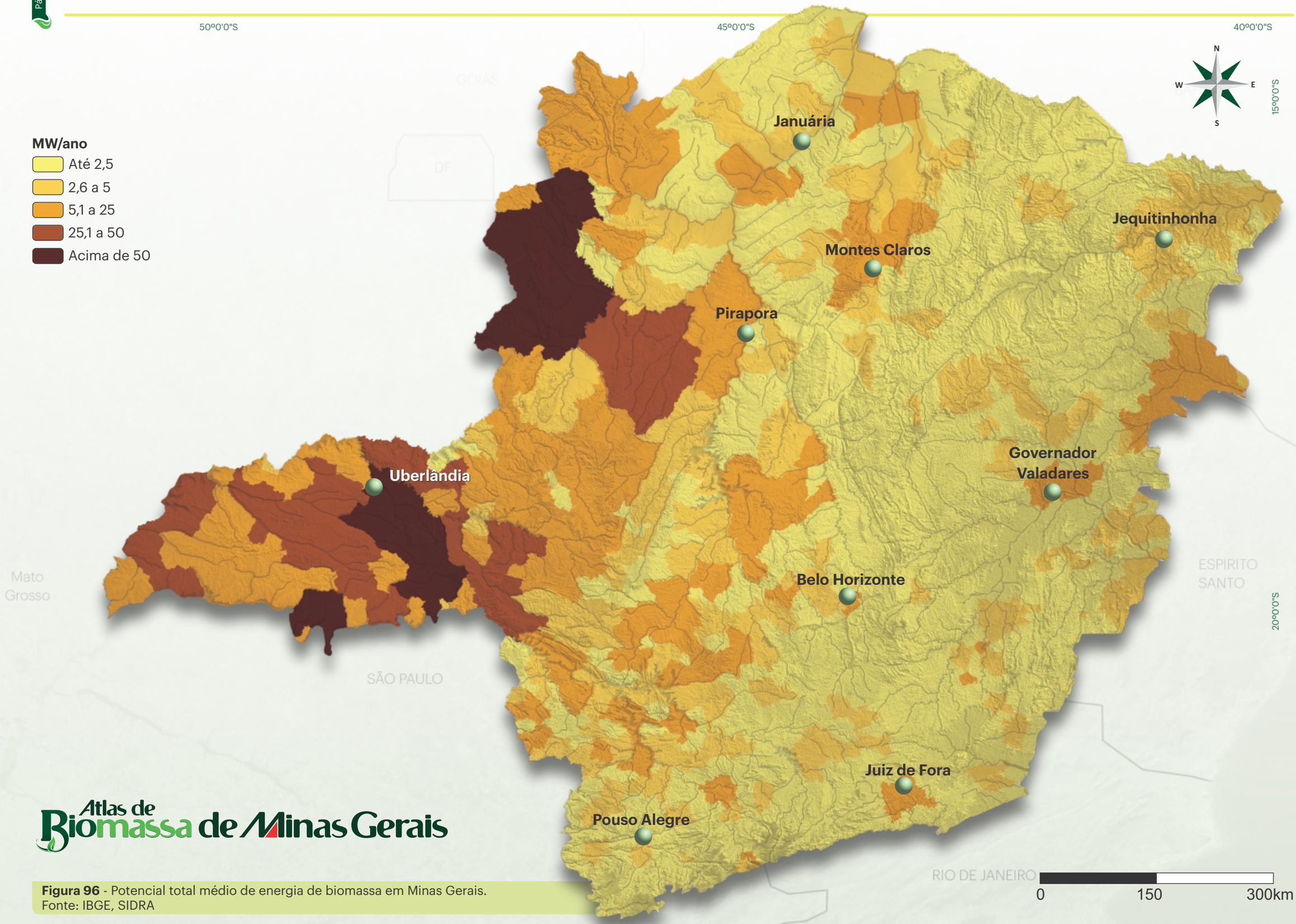
Assim, o presente estudo explora, estrategicamente alicerçado na tecnologia dos sistemas de informações geográficas, as inúmeras possibilidades para produção de biomassa, enfatizando-se o elevado potencial dos resíduos agrícolas e florestais.

O potencial total de energia elétrica para Minas Gerais foi de 2.680 MW, o que corresponde a uma quantidade de energia disponível de aproximadamente 21 milhões de MWh. Se toda esta energia fosse produzida a partir da biomassa, poderiam ser iluminadas mais de 11 milhões de residências, com consumo médio de 150 kWh.mês^{-1}. As fontes de biomassa que apresentaram maior potencial energético foram os efluentes líquidos bovinos, a cana-de-açúcar (bagaço) e o milho, com 917 MW, 688 MW e 452 MW, respectivamente (TABELA 44).

Fontes de Biomassa	Produção	Unidade	Potencial Energético (MW)	Energia Disponível (MWh)	Nº Equivalente de Residências (150kWh.mês^{-1})
Café (casca)	1.458.062	Tonelada	42	345.846	192.136
Cana-de-Açucar (bagaço)	63.758.976	Tonelada	688	3.825.539	2.125.299
Cana-de-Açucar (vinhaça)	31.879.488	Tonelada	67	589.410	327.450
Milho (resíduos)	6.917.527	Tonelada	452	3.763.833	2.091.018
Soja (palha)	3.193.685	Tonelada	92	765.620	425.345
Resíduos de Madeira em Tora	11.662.395	m³ madeira em tora	98	815.046	452.803
Efluentes Líquidos Bovinos	23.708.263	m³ de metano	917	8.032.109	4.462.283
Efluentes Líquidos Aves	116.353.651	m³ de metano	120	1.054.737	585.965
Efluentes Líquidos Suínos	5.091.824	m³ de metano	82	715.426	397.459
Efluentes Líquidos Domésticos	60.587.891	m³ de metano	19	169.725	94.292
Resíduos Sólidos Urbanos	320.786.047	m³ de metano	103	898.619	499.233
Total			**2.680**	**20.975.910**	**11.653.284**

Tabela 44 - Média do potencial e energia disponível para Minas Gerais (2010-2015)

Analisando-se o panorama da energia da biomassa por município, as cidades que apresentaram maior potencial energético foram Uberaba (118 MW), Uberlândia (59 MW), Frutal (55 MW) e Paracatu (53 MW). São municípios que possuem uma agropecuária fortemente desenvolvida, além de grandes áreas para produção. A Figura 96 apresenta o potencial total de energia elétrica a partir de biomassa para todos os municípios de Minas Gerais.



Atlas de Biomassa de Minas Gerais

Figura 96 - Potencial total médio de energia de biomassa em Minas Gerais.
Fonte: IBGE, SIDRA

5.1 - Desafios

A viabilização das quatro fontes de agroenergia, condição *sine qua non* para consolidar a transição da matriz energética brasileira, priorizando-se o uso de fontes renováveis de energia limpa, impõe diferentes desafios, apresentados a seguir.

- Biomassa florestal: a baixa densidade e a alta dispersão geográfica dos volumes disponíveis e potenciais, em relação às plantas industriais existentes para geração de bioenergia, exigem a conversão prévia dessa biomassa em subprodutos como carvão, *pellets*, briquetes, de maior densidade energética, para baratear o seu transporte até as plantas de produção de bioenergia, facilitando seu uso final (RANTA, 2005).

O problema, no entanto, é bem mais complexo; há que se considerar inúmeras restrições e exigências de natureza legal (ambientais e sociais), econômica e técnica, para só então se buscar uma solução ótima. Este é um problema clássico de logística de distribuição, em que se mesclam infinitas possibilidades de arranjos da distribuição espacial e tamanhos de unidades de densificação e de usinas de bioenergia com as distâncias de transporte da matéria prima e de transmissão de energia. Sua formulação – e solução– como um modelo de alocação-localização, combinando as técnicas de programação linear com os recursos de análise espacial disponibilizados pelos sistemas de informações geográficas, envolve, via de regra, as seguintes variáveis (TEIXEIRA, 2016):

a) quantidade de biomassa disponível na porteira de cada propriedade;

b) tipo de estrada, distância e custo de transporte até o destino mais próximo (ponto de transbordo, unidade de densificação ou usina de geração de bioenergia);

c) custo de construção de ramais de transmissão de energia elétrica;

d) restrições legais:

I - distância mínima de áreas urbanas, corpos d'água, malhas viárias, aeroportos;

II - áreas de exclusão (áreas de proteção ambiental, terras indígenas);

e) restrições econômicas:

I - distância máxima de transporte;

II - custo de construção de uma unidade adicional de densificação de biomassa;

III - custo de construção de uma planta adicional de geração de bioenergia;

IV - áreas de exclusão: benfeitorias rurais, áreas de cultivo, áreas urbanas;

f) restrições técnicas:

I - condições edáficas (declividade máxima do terreno, tipo de solo);

II - modais de transporte suportados em cada tipo de estrada;

III - capacidades mínima e máxima de processamento da unidade de densificação;

IV - capacidades mínima e máxima de processamento da planta de geração de bioenergia;

V - comprimento máximo do ramal de transmissão de energia elétrica.

Cana-de-açúcar: a principal ameaça à hegemonia do programa brasileiro de produção de etanol de cana-de-açúcar é o rápido e significativo avanço do etanol de segunda geração – o etanol celulósico. O Brasil poderá perder toda sua vantagem competitiva, uma vez que qualquer biomassa celulósica, inclusive a cana-de-açúcar e o milho, servirá de matéria-prima. Os Estados Unidos e Canadá vêm investindo maciçamente na construção de biorrefinarias de celulose (FIGURA 97) e em tecnologias para produção de células de combustível a etanol. Esta última põe fim aos problemas de infraestrutura para produção, distribuição e armazenamento do hidrogênio para uso automotivo. Ao dispor de uma rede de postos de combustíveis para a distribuição de etanol, abrangendo todo o país, o Brasil já tem, indiretamente, resolvido, de forma econômica e segura, o problema da logística de distribuição de hidrogênio.

Biodiesel de fontes lipídicas: o Programa Nacional de Produção de uso do Biodiesel (PNPB) foi concebido com um forte viés social, visando ao fortalecimento da agricultura familiar, principalmente a do semiárido nordestino, que ficaria encarregada do cultivo de oleaginosas para produção de biodiesel. Entretanto, a viabilidade econômica do biodiesel produzido a partir de culturas como mamona, girassol, canola, pinhão manso, dendê e macaúba ainda depende essencialmente de pesquisas e avanços tecnológicos. Atualmente, as principais matérias-primas utilizadas no Brasil são a soja e o sebo de boi, cuja produção está a cargo de grandes empresários. Os estados do Rio Grande do Sul, Goiás, Mato Grosso e São Paulo respondem por mais de 80% da produção de oleaginosas e do volume produzido de biodiesel, o que aponta para uma elevada disparidade regional, contrariando as expectativas originais do PNPB. A baixa oferta de matéria prima no Nordeste resulta frequentemente quebra de contratos entre os pequenos agricultores e as indústrias. Assim, para viabilizar a produção de biodiesel nessa região, as grandes indústrias ali instaladas acabam tendo que comprar a soja e óleo de soja produzidos no Centro-Oeste. Outro fator agravante é o melhor preço obtido pelos agricultores com a comercialização da mamona para as indústrias de lubrificantes e farmacêutica, que pagam o triplo do valor pago pelas biorrefinarias (SANTOS e WEHRMANN, 2010). Como estratégia para incrementar a demanda de biodiesel, os empresários do setor e lideranças políticas pressionam para elevar a adição do biodiesel ao diesel, passando gradualmente dos atuais 5% para até 20% ao longo dos próximos anos. À semelhança do que ocorre com o etanol, tal fato só reforça a falta de competitividade econômica do biodiesel frente à sua versão fóssil.

Resíduos agropecuários e industriais: no que tange aos resíduos da agricultura e da pecuária, os desafios – e suas soluções – assemelham-se àqueles enfrentados pelas fontes de biomassa florestal, caracterizando-se por elevada dispersão geográfica e baixa densidade energética. O grande desafio deste grupo refere-se ao aproveitamento de esgotos urbanos para fins energéticos.

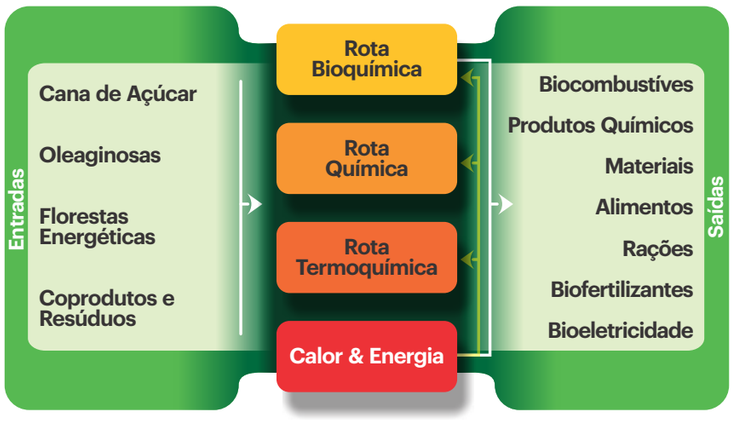


Figura 97 - Visão conceitual brasileira de biorrefinaria. - Fonte: VAZ, 2011.

5.2 - Perpectivas

Ao completar uma década de existência, os resultados do Plano Nacional de Produção e uso do Biodiesel não deixam dúvidas acerca do sucesso do segmento industrial, contrapondo-se ao visível fracasso da inserção social no campo e da frustação do aumento da competividade do agronegócio familiar. Este quadro é agravado pelos atrasos no desenvolvimento e consolidação de novas culturas oleaginosas mais produtivas que a soja.

As intensas e rápidas mudanças no panorama energético internacional apontam para o firme propósito de as principais economias elevarem significativamente a participação de fontes renováveis de energia limpa em suas matrizes energéticas, como forma de mitigarem os efeitos deletérios do aquecimento global e das mudanças climáticas. Inicialmente, isto pode parecer uma oportunidade ímpar para o crescimento e consolidação do Brasil como grande fornecedor mundial de biocombustíveis, dadas suas vantagens competitivas, tais como, grande disponibilidade de área, condições edafoclimáticas adequadas e mão-de-obra barata.

Entretanto, o investimento maciço dos governos dos Estados Unidos e da União Europeia em pesquisas para viabilizar comercialmente a tecnologia de hidrólise enzimática de celulose sinaliza uma nova era na produção de etanol – o de segunda geração. Esse etanol lignocelulósico poderá ser então produzido a partir de qualquer biomassa celulósica, destacando-se as imensas lavouras de milho norte americanas. Acabam-se, assim, as atuais vantagens competitivas do Brasil quanto à produção de bioenergia (GAZZONI, 2008).

Por fim, o domínio do setor de agroenergia em escala mundial estará nas mãos de quem dominar a tecnologia mais competitiva para conversão de biomassa genérica em energia.

Referências Bibliográficas

ABIC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. (2015). Indicadores da indústria de café no Brasil – 2015. Desempenho da Produção e do Consumo Interno. Disponível em: http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=61, acesso em: 29 de janeiro de 2017.

_ (2017). Programa de qualidade do café: qualidade do café. Disponível em: http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=68, acesso em: 29 de janeiro de 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1993). Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. ABNT, Rio de Janeiro.
_ (2004). NBR 10004 – Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro/RJ.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (2008). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2007. Abrelpe, 2008.
_ (2009). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2008. Abrelpe, 2009.
_ (2010). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2009. Abrelpe, 2010.
_ (2011). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010. Abrelpe, 2011.
_ (2012). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011. Abrelpe, 2012.
_ (2013). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012. Abrelpe, 2013.
_ (2013a). Resíduos sólidos: manual de boas práticas no planejamento. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/arquivos/manual_portugues_2013.pdf. Acessado em 20/03/2016.
_ (2014). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013. Abrelpe, 2014.
_ (2015). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014. Abrelpe, 2015.
_ (2016). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015. Abrelpe, 2016.

AGRIC – INFORMAÇÕES SOBRE O MUNDO AGRÍCOLA. (2017). Produção de cana-de-açúcar. Disponível em: http://www.agric.com.br/producoes/cultivo_da_cana.html, acesso em 24/04/2017.

ALCARDE, A.R. (2017). Cana-de-açúcar. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html, acesso em 26/04/2017.

ALEM SOBRINHO, P. (2001). Tratamento de esgoto e produção de lodo. In: Biossólidos na agricultura. São Paulo: SABESP, p. 7 – 40.

ALFONSI, W. M. V., BOSCHI, R. R., EVANGELISTA, B. A., ALFONSI, R. R., BONIDE, A. G.; SANS, L. M., WREGE, M. S. (2011). Zoneamento agrícola de risco climático do Eucalyptus grandis para a região Sudeste do Brasil. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 18 a 21 de julho de 2011. Guarapari-ES.

ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728.

AMORIM NETO, M. S.; ARAÚJO, A.E.; BELTRÃO, N.E. M. (2001). Clima e solo. In: O agronegócio da mamona no Brasil. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 37- 61.

ANDRADE, C.R. (2009). Espectroscopia no infravermelho próximo para predizer propriedades da madeira e do carvão vegetal de plantio clonal de Eucalyptus sp. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras. Lavras/MG.

ANDRADE, J. (2009a). Construção de um Índice de Sustentabilidade Ambiental para a Agroindústria Paulista de Cana-de-Açúcar [ISAAC]. Dissertação (Mestrado Profissional), Escola de Economia de São Paulo, Faculdade Getúlio Vargas, São Paulo, 259 p.

ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. (2001). Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final. Rio de Janeiro: Editora ABES.

_(2007). Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. 3. Ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. 484p.
ANEEL – Agência Brasileira de Energia Elétrica. (2016). Banco de Informações de Geração – Matriz de Energia Elétrica. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm, acesso em: 20/08/2016.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. (2009). Disponível em: http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel, acesso em: 29/01/2017.

APROSOJA BRASIL - ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE SOJA E MILHO DO ESTADO DE MATO GROSSO. (2014). Uso da soja. Disponível em: http://aprosojabrasil.com.br/2014/sobre-a-soja/uso-da-soja/, acesso em: 10/09/2016.

ARANTES, M.D.C. (2009). Variação nas características da madeira e do carvão vegetal de um híbrido de Eucalyptus grandis W.Hill ex Maiden x Eucalyptus urophylla S. T. Blake. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira). UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. p.155. Lavras/MG.

ARISTONE, F., OLIVEIRA, T. C. M. (2004) Exploração autosustentável da bocaiúva na região do Pantanal Sul-Matogrossense: geração de renda e equilíbrio do meio ambiente. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

ARCADIS TETRAPLAN. (2010). Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável. Produto 6 – Resumo Executivo. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimentos – PNUD, Ministério do Meio Ambiente. São Paulo.

ARRUDA, F.B.; IAFFE, A.; SAKAI, E.; CALHEIROS, R.O. (2000). Resultados anuais do coeficiente de cultura do cafeeiro em um ensaio em Pindorama - SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 1. Poços de Caldas. Resumos expandidos... Brasília: EMBRAPA Café/MINASPLAN, v.2, p.790.

ARRUDA, F. P.; BELTRÃO, N. E. M; ANDRADE, A.P.; PEREIRA, W. E. e SEVERINO, L. S. (2004). Cultivo de pinhão manso para o Semi Árido nordestino. Revista Brasileira de Óleos e Fibras. Campina Grande, v.8, n.1, p.789-799.

ASSAD, E. D., PINTO, H. S., JUNIOR, J. Z., ÁVILA, A. M. H. (2004). Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 39, n. 11, p. 1057-1064.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL – ABPA (2016). Relatório anual 2016. Disponível em: http://abpa-br.com.br/setores/avicultura/publicacoes/relatorios-anuais, acesso em: 05/04/2017.

AVELAR, R. C. (2009). Característica fitotécnicas do pinhão-manso, visando à colheita mecanizada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. 109p. Lavras/MG.

AZEVEDO FILHO, J.A., COLOMBO, C.A., BERTON, L.H.C. (2012). Macauba: palmeira nativa como opção bioenergética. Pesquisa & Tecnologia, v9 (2).

AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E. F.; BATISTA, F. A. S. (1997). Recomendações técnicas para o cultivo da mamoneira (Ricinus communis L.) no Brasil. Campina Grande: CNPA. 52p.

BANCO DO BRASIL - BB. (2010). Bovinocultura de leite. Desenvolvimento regional sustentável. Série cadernos de propostas para atuação em cadeias produtivas. Volume 1. Brasília.

BARBIERI, L.; BATTELLI, M. G.; STIRPE, F. (1993). Ribosome nactivating proteins from plants. Biochimica biophysica. Acta, Amsterdam, v. 1154, n. 3/4, p. 237-282.

BASHA, S.D.; FRANCIS, G.; MAKKAR, H.P.S.; BECKER, K.; SUJATHA, M. (2009). A comparative study of biochemical traits and molecular markers for assessment of genetic relationships between Jatropha curcas L. germplasm from different countries. Plant Science, v.176, p.812-823.

BATISTELLA, M., ANDRADE, R. G., BOLFE, E.L., VICTORIA, D. C., SILVA, G. B. S. (2011). Geotecnologias e gestão territorial da bovinocultura no Brasil. R. Bras. Zootec., 40, 251-260.

BELTRÃO N. E. M., ARAUJO, A. E., GONÇALVES, N. P., AMARAL, J. A. B., SEVERINO, L. S., CARDOSO, G. D., CARDOSO, G. Q. (2004). Oferta ambiental, via zoneamento agroecológico, para a ricinicultura na Região Norte de Minas Gerais. In: I Congresso Brasileiro de Mamona – Energia e Sustentabilidade., Campina Grande, PB.

BELTRÃO N. E. M., OLIVEIRA, M. I. P., BRITO, G. G., FIDELIS FILHO, J. (2009). Mamona. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Org.). Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET. p. 225-235.

BENEMANN, J. R. Microalgae Biofuels: A Brief Introduction. (2009). © John Benemann, January 1. 2009. . Disponível em https://www.adelaide.edu.au/biogas/renewable/biofuels_introduction.pdf, acesso em: 03/03/2016.

BERGMAN, P.; KIEL, J. (2005). Torrefaction for biomass upgrading. In: EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE, 14., Anais... Paris: ETA Renewable Energies, (Florence, Italy) and WIP Renewable Energies (Munich, Germany). p. 1-8.

BERTON, L.H.C. (2013). Avaliação de populações naturais, estimativas de parâmetros genéticos e seleção de genótipos elite de macaúba (Acrocomia aculeata). Campinas, 154 fls.

BHERING, L. (2009). Macaúba: matéria prima nativa com potencial para produção de biodiesel. Embrapa, p. 1-4.

BIODIESELS (2014). Macaúba é matéria-prima promissora para biodiesel. 30/12/14. Disponível em: http://www.biodiesels.com.br/macauba-e-materia-prima-promissora-para-biodiesel/, acesso em: 06/01/2015.

BIDONE, F.R.A. & POVINELLI, J. (1999). Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. São Carlos, EESC/USP – Projeto REENGE, 120 p.

BLEY JÚNIOR, B.C., LIBÂNIO, J.C., GALINKIN, M., OLIVEIRA, M. M. (2009). Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. 2ª ed. rev. - Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora.

BONDAR, G. (1964). Palmeiras do Brasil. São Paulo: Instituto de Botânica, São Paulo, n:2, p. 50-554.

BRADESCO (2017). Carne Bovina. DEPEC – Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos. Disponível em: https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_carne_bovina.pdf, acesso em: 04/04/2017.

BRAND, M. A. (2010). Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 131 p.

BRASIL. (1985) Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais. Ministério da Indústria e do Comércio. Secretária de Tecnologia Industrial. Brasília, STI/CIT. 364 p.
_ (2011). Decreto Presidencial no 7.660 – Aprova a Tabela de Incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados. 23 de dezembro de 2011. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/decreto/d7660.htm, acesso em: 07/12/2016.

BRASILEIRO, B. P. (2010). Conservação e melhoramento genético do pinhão-manso (Jatropha curcas L.). 83f.; il. Cruz das Almas/BA.

BRASSOLATTI, T. F. Z.; HESPANHOL, P.A.; COSTA, M. A. B.; BRASSOLATTI, M. (2016). Etanol de primeira e segunda geração. Revista Interdisciplinar de Tecnologias e Educação. ISSN 2447-5955.

BRIANE, D. DOAT, J. (1985). Guide technique de la carbonisation. EDISUD, Aixen-Provence.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. (1982). Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, Piracicaba. Anais... Piracicaba: ESALQ. p. 101-137.

_BRITO, J. O. (2007). O uso energético da madeira. Estudos Avançados, 21 (59), IEA, Universidade de São Paulo.

BUENO, O. C., ESPERANCINI, M. S. T., TAKITANE, I. C. (2015). Produção de biodiesel no Brasil: aspectos socioeconômicos e ambientais. Ceres, v. 56, n. 4.

CAMPOS, A. C. M. (2008). Carvão de Eucalyptus: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. 128p. Lavras/MG.

CANAL RURAL (2016). Pecuária de corte movimenta o dobro do PIB da cadeia de soja. Disponível em: http://www.canalrural.com.br/noticias/boi-gordo/pecuaria-corte-movimenta-dobro-pib-cadeia-soja-62900, acesso em: 07/04/2017.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A.M.; NETO, S. C. (2010). A Revolução Verde da Mamona. Química Nova na Escola, Vol. 32, Nº 1.

CARNIELLI, F. (2003). O combustível do futuro. Disponível em: www.ufmg.br/boletim/bul1413, acesso em: 20/03/2016.

CARVALHO, F.C. de. (1992). Disponibilidade de resíduos agroindustriais e do beneficiamento de produtos agrícolas. In: SIMPÓSIO DE UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS E RESÍDUOS DE COLHEITA NA ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES. São Carlos. Anais... São Carlos: EMBRAPA. 349 p. P. 7-27.

CASTANHO, D.S., ARRUDA, H.J. (2008). Biodigestores. In: VI Semana de Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal do Paraná. Anais, v. 2 (21). ISSN: 1981-366X.

CASTELLANOS, Juan. (2006). Biodiesel do óleo de Pinhão-manso. Jornal Periódico Hoy. - Disponível em: http://www.biodieselbr.com/blog/vedana/2006/biodiesel-oleo-pinhao-manso/, acesso em 10/111/2016.

CATALUNHA, M. J.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, A. (2002). Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.10, n.1, p.153-162.

CAVALCANTE, F.S. (2004) A Importância da Mamona para a Agricultura Familiar no Estado da Paraíba. Revista Eletrônica de Ciências, Número 27, Junho/Julho/Agosto de 2004.

CAVIGLIONE, J. H.; RICCE, W. S.; CARAMORI, P. H.; FONSECA JUNIOR, N. S.; OLIVEIRA, D.; YAMAOKA, R.S. (2008). Zoneamento Da Mamona no estado do Paraná. In: III Congresso Brasileiro de Mamona, Salvador. Anais. Salvador: Embrapa,
CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. (2011). Manual de arborização. Belo Horizonte: Cemig / Fundação Biodiversitas. 112 p.: ilust.

_ (2012). Alternativas energéticas: uma visão CEMIG. Belo Horizonte: Cemig. 357: ilust. ISBN: 978-85-87-929-51-8.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. (2007). 3º Relatório parcial do projeto Fortalecimento Institucional do Centro nacional de Referência em Biomassa.

_ (2012). Atlas de Bioenergia do Brasil, Metodologias de cálculo da conversão energética das biomassas selecionadas. IEE USP. São Paulo/SP. 9p.

_ (2015). Biomass Residues as Energy Source to Improve Energy Access and Local Economic Activity in low HDI regions in Brazil and Colombia, Projeto em desenvolvimento pelo Cenbio/IEE/USP Centro clima/COPPE/UFRJ/GNESD.

CHEN, G., ZHAO L., QI, Y. (2015). Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review. Applied Energy. 137. 282-291.

CHERNICHARO, C.A.L. (2007). Reatores anaeróbios. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 380p.

CHISTI, Y. (2013). Constraints to commercialization of algal fuels. Journal of Biotechnology. 167, 201-214.

CHISTI, Y., YAN, J. (2011). Algal biofuels—a status report. Applied Energy 88. 3277–3279.

CICONINI, G.; FAVARO, S. P.; ROSCOE, R.; MIRANDA, C. H. B.; TAPETI, C. F.; MIYAHIRA, M. A. M.; BEARARI, L.; GALVANI, F.; BORSATO, A. V.; COLNAGO, L. A.; NAKA, M. H. (2013). Biometry and oil contents of Acrocomia aculeata fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. Industrial Crops and Products, Amsterdam, v. 45, p. 208-214.

COELHO, W. L. V et al. (2016). Análise do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do setor sucroenergético no estado de mato grosso em diferentes cenários produtivos. Revista Brasileira de Energias Renováveis, p. 1–13.

Referências Bibliográficas

COLLARES, D. (2010). Macaúba - matéria-prima para o biodiesel. Disponível em: http://hotsites.sct.embrapa.br/prosarural/programacao/2010/macauba-materia-prima-para-o-biodiesel, acesso em: 16/12/2014.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2015). Acompanhamento da safra brasileira da cana-de-açúcar. V. 2 – Safra 2015/16, n. 1 - Primeiro Levantamento, Brasília, abr.

_ (2016). Análise dos custos de produção e rentabilidade da cultura do milho. Compêndio de Estudos Conab, v.1. Brasília: Conab. ISSN: 2448-3710.

_ (2016a). Acompanhamento da safra brasileira Grãos. V.3 – Safra2015/16 – N. 6 – Sexto Levantamento. ISSN 2318-6852.

_ (2017). Observatório agrícola: acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília , v. 4, p. 1 -98. Disponível em: <www.conab,fov.br>. Acesso em: 29 de janeiro de 2017.

_ (2017a). Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil. Edição para a safra 2012/13. v. 5, p. 80. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_01_05_15_02_45_perfil_sucroalcool2012e13.pdf, acesso em: 10/03/2017.

COPASA – COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (2012). ETE Arrudas. Disponível em http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/imprensa/noticias/releases/2012/maio/ete-arrudas-2005031010-ie470/!ut/p/a0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOJ9DLwdPby9Dbz8gzzdDBy9g_zd_T2dgvx8zfULsh0VAfwq3Iw!/. Acesso em 19/04/2017.

CORTESÃO, M. (1956). Culturas tropicais: plantas oleaginosas. Lisboa: Clássica. 231p.

CORTEZ, C. L.; COELHO S. T.; GRISOLI, R.; GRAVIOLI F. (2008). Compostagem de resíduos de poda urbana. Disponível em:
http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnica_ix.pdf, acesso em 15 de maio 2008.

COSTA, F.R. (2014). Modelo de aptidão e de localização-alocação de usinas bioenergéticas utilizando Sistemas de Informações Geográficas. Dissertação (Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. 62 f. Viçosa/MG

CRISPIM, J. E. & VIEIRA, S. A. (2017). Cana-de-açúcar: boa alternativa agrícola e energética para a agricultura nacional. Disponível em: http:planetaorganico.com/trabcana1.htm, acesso em: 24/04/2017.

CROMAR, N.J., FALLOWFIELD, H.J. (1997). Effect of nutrient loading and retention time on performance of high rate algal ponds. Journal of Applied Phycology, 9, pp. 301-309.

DALL'AGNOL, A. (2007). Por que fazemos biodiesel de soja. Disponível em: http://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/convidado/porque-fazemos-biodiesel-de-soja.htm. Acesso em: 20/03/2016.

DEGANUTTI, R., PALHACI, M.C.J.P., ROSSI, M., TAVARES, R., SANTOS, C. (2002). Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. Enc. Energ. Meio Rural, An. 4, 2002.

DIESEL, R. (2002). Coletânea De Tecnologias Sobre Dejetos Suínos. Boletim Informativo de Pesquisa; Embrapa Suínos e Aves e Extensão. EMATER/RS. BIPERS nº 14 - ANO 10.

DOAT, J.; PETROFF, G. (1975). La carbonization des bois tropicaux. Bois et Forêts des Tropiques, Nogent-sur-Marne, v. 159, p. 55-72, jan./fev.

DOHLER, R. E.; KLIPPEL, A. H.; XAVIER, A. C.; PIMENTA, L. R.; CASTRO, F. S. (2014). Análise temporal da necessidade de irrigação para o Eucalyptus grandis no município de São Mateus-ES. Enciclopédia Biosfera, v. 10, p. 118-127.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.K. (1994). Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba. 306p.

Do ROSÁRIO, C. (2006). Jatropha Curcas Proposta para a Sustentabilidade do Cultivo em Moçambique. Nova Delhi. 31pp.

DURÃES, F. O. M. (2008). Potenciais e oportunidades para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva para a macaúba. Workshop sobre a macaúba, Apresentação, Secretaria Estadual de Agricultura pecuária e abastecimento de Minas Gerais, Belo Horizonte.

EBC - EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO. (2017) Disponível em: http://www.agenciabrasil.gov.br/noticias/2009/01/08/materia.2009-01-08.6135720985/view, acesso em 28 de janeiro de 2017.

EIA - Energy Information Administration (2016). Renewable Energy - Official Energy Statistics from the U.S. Government. Disponível em: <http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=, acesso em: 14/10/2016.

EMATER – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais. (2017). A Cultura do Milho. Disponível em: http://www.emater.mg.gov.br/doc%5Csite%5Cserevicoseprodutos%5Clivraria%5CCulturas%5CCultura%20do%20Milho.pdf, acesso em: 23/02/2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2010). Embrapa Milho e Sorgo - Cultivo do Milho. Disponível em: http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/manejomilho.htm, acesso em: 22/02/2017.

_ (2015). Produção de soja. Disponível em: http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm, acesso em 07/04/2016.

_ (2016). Disponível em: http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/plantio.html, acesso em 8/04/2016.

_ (2017). EMBRAPA suínos e aves. Mapas e infográficos. Disponível em: https://www.embrapa.br/documents/1355242/9156138/Produ%C3%A7%C3%A3o+e+exporta%C3%A7%C3%A3o+do+Brasil.jpg/271ffcc0-e6fd-45eb-9154-51a30a2aea6c?t=1472841522032, acesso 06/04/2017.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. (2008). Plano Nacional de Energia 2030, cap 8: Geração Termelétrica – Biomassa. Disponível em: http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_8.pdf, acesso em 10/04/2017.

_ (2008a). Balanço Energético Nacional 2008: ano base 2007. Rio de Janeiro/RJ.

_ (2014). Balanço Energético Nacional 2014: ano base 2013. Rio de Janeiro/RJ.

_ (2014a). Inventário Energético de Resíduos Rurais (Nota Técnica DEA 15/14). Rio de Janeiro/RJ.

_ (2016). Balanço Energético Nacional 2016: ano base 2015. Rio de Janeiro/RJ. 62p.

FAO STATISTICS. FAO – Food Agriculture Organization of the United Nations. Production and trade (2015). Castor beans. Disponível em: http://faostat.fao.org, acesso em: 29/01/2015.

_ (2016). Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação. Disponível em http://faostat.fao.org/site/339/default .aspx, acesso em fevereiro 2016.

FARIA FILHO, D.E.; DIAS, A.N.; BUENO, CFD; MATOS JÚNIOR, J.B; COUTO, F.A.P. (2010). Subprodutos da mamona na alimentação de aves. Produção Animal - Avicultura, p. 24 - 26, 01.

FAVARIN, J. L.; OLIVEIRA, A. C. B. (2013). Zoneamento Agrícola: há o que se considerar? Visão Agrícola, nº 12, p 88-89.

FEACHEM, R. G., BRADLEY, D. J., GARELECK, H., MARA, D. D. (1983). Sanitation and Disease - Health Aspects of Excreta and Wastewater Management. Pub. World Bank, John Wiley & Sons, USA, p. 8.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (2014). Potencial de Energias Renováveis. Volume II – Biomassa, resíduos e hidroeletricidade. Belo Horizonte/MG. 120p.

_ (2015). Panorama da Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos no Estado de Minas Gerais em 2014. Belo Horizonte/MG.

FERREIRA-LEITÃO, V., GOTTSCHALK, L. M. F., FERRARA, M. A., NEPOMUCENO, A. L., MOLINARI, H. B. C., BON, E. P. (2010). Biomass residues in Brazil: availability and potential uses. Waste and Biomass Valorization, v. 1, n. 1, p. 65-76.

FERNANDO, J. (2006). Revisão sobre Jatropha curcas, seus usos e seu potencial para produção de biodiesel em Moçambique. ICRAF/IIAM, TechnoServe.

FOELKEL, C.E.B. (2009). Individualização das fibras da Madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft.

FLÖRKE, M., KYNAST, E., BÄRLUND, I., EISNER, S., WIMMERA, F., ALCAMO, J. (2013). Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development: global simulation study. Glob Environ Change.23 (1). 144–156.

FONTS, I.; GEA, G.; AZUARA, M.; ÁBREGO, J.; ARAUZO, J. (2012). Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p. 2.781– 2.805.

FREDERICO, P. G. U. (2009). Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa. 86 p. Viçosa/MG.

FREPPAZ, D.; MINCIADIA, R.; ROBBAB, M.; ROVATTIA, M.; SACILEA, R.; TARAMASSOA, A. (2004). Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level. Biomass and Bioenergy. v. 26, n. 1, p.15-25. DOI: 10.1016/s09619534(03)00079-5.

FRITZ, A.G.N.C., VIEIRA, G.E.G., SANTOS JUNIOR, R.K. (2011). Reaproveitamento e caracterização do lodo de esgoto para produção de energia renovável. Biomassa & Energia, v. 4, n. 2, p. 121-130.

FROEHLICH, A. G.; JUSTEN, G. S.; LUPPI, L.; MORAES. S. (2012). Utilização de biomassa para geração de energia: estudo de caso em uma indústria madeireira de Aripuanã- MT. In: VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão.

GAZZONI, D. L. (2006). As políticas públicas de biocombustíveis e o mercado de oleaginosas. EMBRAPA. Disponível em: http://200.144.182.46/midiateca/apresentacao/politicaspublicasgazzoni.pdf, acesso em: 10/12/2016.

_ (2008). Agroenergia: situação atual e perspectivas. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A.L., editores. Savanas: desafios e estratégias para equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 861–878.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. (2006). Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. An. 6. Encontro de Energia do Meio Rural.

GENTIL, L.V.B. (2008). Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira. Brasília, Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade de Brasília. 195 f. Brasilia/DF.

GIOMO, G. S. (2006). Informações eletrônicas. Instituto Agronômico de Campinas. Campinas/SP.

GOLFARI, L. (1975). Zoneamento Ecológico do Estado de Minas Gerais para Reflorestamento. Belo Horizonte, MG: PRODEPEF (Série Técnica, 3, p.65).

GOMES, F.A. (2009). Avaliação dos processos kraft convencional e Lo-Solids® para madeira de Pinus taeda I. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ-USP. 99f. Piracicaba/SP.

GOVERNO DE SÃO PAULO, Secretaria de Energia e Mineração (2016). Resíduos sólidos. Disponível em: http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/residuos-solidos. acesso 14/04/2016.

GRANATO, E. F. & SILVA, C. L. (2002). Geração de energia elétrica a partir do resíduo vinhaça. In Procedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002, Campinas (SP) [online]. 2002 [cited 24 April 2017]. Available from: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200006&lng=en&nrm=iso, acesso em: 10/12/2016.

HADDAD, C. M. (1995). Noções sobre confinamento de bovinos de corte. In: Curso de atualização em Confinamentos de bovinos de corte, FEALQ, Piracicaba.

HASSE, G. (2006). Eucalipto: histórias de um imigrante vegetal. Porto Alegre: JA Editores. 127p.

HEFFER, P. Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level 2010-2010/11. International Fertilizer Industry Association (IFA). 2013. Disponível em http://www.fertilizer.org/En/Statistics/FUBC_Database.aspx?WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306, acesso em: 20/03/2016.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. (1995) Field Guide to the Palms of the Americas. New Jersey: Princepton University, p.166-167.

HIJMANS, R. J., CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G., JARVIS, A. (2006). The WorldClim interpolated global terrestrial climate surfaces. Version 1.4. Disponível em <www. worldclim. org>, acesso em: 10/12/2016.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J.; ÁVILA, M. T. (2010). Avaliação da relação entre soja e produção de biodiesel. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Tecnologias, desenvolvimento e integração social: anais. Campo Grande/MS: SOBER.

HUANG, D. R.; HUANG, D. H.; GUO, S. X.; PAN, K. Z.; HUANG, Z. Q.; LIN, J. Z. (1991). Purification and partial characterization of toxin from Jatropha curcas. Progress in Biochemical Biophysics, London, v. 18, n. 2, p. 149-151.

IBÁ – INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. (2016). Anuário Estatístico 2016, ano base 2015. 100f. São Paulo/SP.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2009). Censo Demográfico e a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD. IBGE. Rio de Janeiro/RJ.
_ (2010). Censo Demográfico 2010. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20/06/2016.
_ (2014). Contas Regionais do Brasil 2012. Contas Nacionais, N. 42. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Regionais/2012/pdf/contas_regionais_2012.pdf>.
_ (2015). Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 01.07.2015. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2015/estimativa_dou.shtm, acesso em: 25/10/0216.
_ (2016). Produção Agrícola Municipal - 2015. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas, acesso em 07 de abril de 2017.
_ (2016a). Produção da Extração Vegetal e Silvicultura – 2015. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2015, acesso em: 10/12/2016.
_ (2016b). Pesquisa Pecuária Municipal - 2015. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas, acesso em: 07/04/2017.

IEA, International Energy Agency. Oil market report. 2015. Disponível em https://www.iea.org/oilmarketreport/omrpublic, acesso em: 21/03/2016.

INNOCENTE, A. F. (2011). Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar – estudo de caso. Dissertação. UNESP. Botucatu/SP.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (1996). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Reference Manual and Workbook.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2012). Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas. Disponível em:
http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf, acesso em: 06/04/2017.

JARDIM, J. M. (2014). Potencial energético de diferentes biomassas agroflorestais. Monografia. 34p.UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA.

JUNQUEIRA, J.B. (2011). Biodigestão anaeróbia e compostagem com dejetos de bovinos confinados e

aplicação do biofertilizante e do composto em área cultivada com Panicum maximum Jacq., cv Tanzânia. Jaboticabal,.xi, 92f.: il.

JURAS, I. (2000). Destino dos resíduos sólidos e legislação sobre o tema. Nota Técnica. Disponível em: http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/tema14/pdf/010371.pdf, acesso em: 10/03/2017.

KARAMAZOVI. (2011). Processo de briquetagem. Disponível em: http://www.karamazovi.com.br/briquetes.html#briquetagem, acesso em: 15/01/2011.

KARJALAINEN, T., ASIKAINEN, A., ILAVSKY, J., ZAMBONI, R., HOTARI, K-E. & RÖSER, D. (2004). Estimation of energy wood potential in Europe. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 6. 43 s. (www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp006.pdf).

KHACHATRYAN, H., JESSUP, E., CASAVANT, K. (2010). A GIS-based Estimation of Regional Biomass Supply and Transportation Costs for Biofuel Plant Least-Cost Location Decisions. Transportation Research Forum.

KHIARI, B., MARIAS, F., ZAGROUBA, F., VAXELAIRE, J. (2004). Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. Desalination. v. 167, p.39-47.

KOOPMANS, A., KOPPEJAN, J. (1997). Agricultural and Forest Residues - Generation, Utilization and Availability. In: Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy, pp. 6-10, Kuala Lumpur, Malaysia, Jan.

KOPPEJAN, J. et al. (2012). Status overview of torrefaction technologies. IEA Bioenergy Task 32 – Final Report. 54 p.

KONZEN, L. A. (1980). Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em crescimento e terminação, manejadas em forma líquida. Dissertação (Mestrado) – Escola de Medicina Veterinária. Universidade Federal de Minas Gerais. 56f. Belo Horizonte/MG.

LAMO, P. de. (1991). Sistema produtor de gás metano através de tratamento de efluentes industriais - METHAX/BIOPAQ – CODISTIL. Piracicaba.

LAVIOLA, B. G. e DIAS, L.A.S. (2008). Teor e acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão-manso. .R. Bras. Ci. Solo, 32:1969-1975.

LAVIOLA, B. G. (2011). Pinhão-manso: os avanços da pesquisa e o que esperamos para o futuro. In: Reunião no MAPA, Brasília, 26 de maio de 2011. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Oleaginosas_e_biodiesel/11RO/App_EMBRAPA.pdf, acesso em: 20/03/02016.

LATORRE, F. L.; HENRIQUES, E. P. (2008). Melhoramento genético do eucalipto visando a produção de carvão vegetal para siderurgia. In: Fórum Nacional de Carvão Vegetal, 1., Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte:Painel Floresta.

LEHTOVAARA, J. (2004). Calorific value – Status of the standardisation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE "STANDARDISATION OF SOLID BIOFUELS, 6-7.,. Leipzig, Germany. Anais eletrônicos... Disponível em: http://www.energetik-leipzig.de/BioNorm/conference.htm, acesso em: 10/10/2005.

LI Y., PARK, S.Y., ZHU, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, pp 821 – 826.

LOBATO, B. (2016). Macaúba é matéria-prima promissora para biodiesel. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2329636/macauba-e-materia-prima-promissora-para-biodiesel, acesso em: 20/03/16.

LORA, E.S., ANDRADE, R.V. (2009). Biomass as energy source in Brazil. Renewable and sustainable energy reviews, v. 13, p. 777–788.

LUDUVICE, M. (2001). Processos de estabilização de lodos. In: Lodos de Esgotos – Tratamento e Disposição Final. Rio de Janeiro: ABES. 484p.

LUDUVICE, M., FERNANDES, F. (2001). Principais tipos de transformação e descarte do lodo. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Ed.: Cleverson V. Andreolli, von SPERLING, Marcos, Fernando Fernandes. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná. 484p. ISBN: 85-88556-01-4.

MACHADO, C. A. C.; ARGANDONA, E. J. S.; HOMEM, G. R.; TOMMASELLI, M. A. G. (2010). Modelo de viabilização da produção do consórcio: macaúba (Acrocomia aculeata) e cana-de-açúcar (Saccharum officinarum). In: Encontro nacional de engenharia de produção, 30. São Carlos. Resumos... São Carlos: ENEGEP, p.1-11.

MAGALHÃES, E. A. (2007). Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. 213f. Viçosa/MG.

MANDAIL, J.C. M.; BELARMINO, L. C.; NEUTZLING, D. M. (2006). Aspectos econômicos da mamona (Ricinus communis L.) e estudo da rentabilidade no Rio Grande do Sul. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 32. Pelotas-RS.

MANZATTO, C. V., ASSAD, E. F., BACCA, J. F. M., ZARONI, M. J., PEREIRA, S. E. M. (2009). Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (2014). Plano Agrícola e Pecuário 2014/2015. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/plano-agricola-pecuario/plano-agricola-e-pecuario-2014-2015.pdf/view, acesso em: 06/04/2017.

_ (2016). Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2015/11/soja-deve-representar-quase-metade-da-safra-brasileira-de-graos-20152016, acesso em: 07/04/2016.

_ (2016a). A Agroenergia no Brasil. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/agroenergia-no-brasil, acesso em:11/10/2016.

MARIN, F.R., PELLEGRINO, G.Q., ASSAD, E.D., PINTO, H.S., ZULLO JUNIOR, J. (2009). Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.). Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET. p.111-130.

MARIN, F. R. (2017). Cana-de-açúcar. Retirado do site: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html, acesso em 23/04/2017.

MARTIN, L.C.T. (1987). Confinamento de bovinos de corte. Modernas técnicas. 2 ed. São Paulo: Livraria Nobel, 124p.

METCALF, EDDY, INC. (2002). Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse. New York: Ed. McGraw-Hill, 1334 p.

MIURA, A. K., FORMAGGIO, A. R., SHIMABUKURO, Y. E., LUIZ, A. J. B., dos ANJOS, S. D., TEMPERADO, E. C. (2011). Potencial das áreas disponíveis ao cultivo de biomassa para produção de energia, nas Microrregiões Sulriograndenses de Cerro Largo, Santa Rosa e Santo Ângelo. Santa Rosa e Santo Ângelo, Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba, PR, Brasil, v. 30.

MME – MNISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2015). Resenha Energética Brasileira - Exercício de 2014. Ministério de Minas e Energia, p.32.

MONTEIRO, J. H. P. et al. (2001). Manual Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro. Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. IBAM.

MORCOTE-RIOS, G., BERNAL, R. (2001). Remains of palms (Palmae) at archaeological sites in the New Word: a review. The Botanical Review, New York, v.67, n.3, p.309-350.

MOTOIKE, S. Y., CARVALHO, M., LOPES, F. A. de, COUTO, F. A. A. (2011). Produção de mudas de macaúba. Boletim Técnico (Acrotech).

MOTTA, P. E., CURI, N., OLIVEIRA-FILHO, A. T., GOMES, J. B. V. (2002). Ocorrência de macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 37, p. 023-1031.

NEVES, E.F.; CROCOMO, F.C. (2005). A relação entre a pobreza e o crescimento econômico do Brasil: uma análise via a propensão marginal a consumir. Disponível em: http://www.unimep.br/phpg/mostraacademica/anais/4mostra/pdfs/546.pdf, acesso em: 08/04/2016.

NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A. (2014). Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. International Journal of Renewable Energy & Biofuels, v. 2014, p. 56.

NOBRE, D. A. C.; Trogello, E.; BORGHETTI, R.A.; DAVID, A.M.S.S. (2014). MACAÚBA (Acrocomia aculeata): palmeira de extração sustentável para biocombustível. Colloquium Agrariae (UNOESTE), v. 10, p. 92-105.

NOGUEIRA, L.A.H. (1986). Biodigestão: a alternativa energética. Editora Nobel. São Paulo/SP.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. (2003). Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 140 p.

NOVACANA (2013). Aspectos do plantio da cana-de-açúcar. Disponível em: https://www.novacana.com/cana-de-acucar/aspectos-plantio-cana-de-acucar/, acesso em: 23/04/2017.

_ (2017). Cana-de-açúcar. Disponível em: https://www.novacana.com/cana-de-acucar/, acesso em: 23/04/2017.

NOVAES, R. F. (1952). Contribuição para o estudo do coco macaúba. Piracicaba, Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo. 85f. Piracicaba/SP.

NUCCI, E.P.D. (1994). Substituição parcial de silagem de milho por palha de trevo vesiculoso (Trifolium vesiculosum Savi cv. "Iuchi") no desempenho de novilhos da raça Charolês em confinamento. Dissertação (Pós-graduação em Zootecnia). Universidade Federal de Santa Maria. 61 p. Santa Maria/RS.

NUCCI, S. M. (2007) Desenvolvimento, caracterização e análise da utilidade de marcadores microssatélites em genética de população de macaúba. Dissertação (Mestrado em Genética, Melhoramento Vegetal e Biotecnologia) - Instituto Agronômico de Campinas. 84 f. São Paulo/SP.

NUNES, C.F. (2007). Caracterização de frutos, sementes e plântulas e cultivo de embriões de pinhão manso ((Jatropha curcas L.). Universidade Federal de Lavras. 78p. Lavras/MG.

OCDE-FAO (2015). Perspectivas Agrícolas no Brasil: desafios da agricultura brasileira 2015-2024. Disponível em: http://www.fao.org.br/download/PA20142015CB.pdf, acesso em: 24/04/2017.

OLIVEIRA, P.A.V. (1993). Manual de manejo e utilização de dejetos suínos. Concórdis: EMBRAPA, CNPSA, 188p. (EMBRAPA, CNPSA. Documentos, 27).

OLIVEIRA, A. J.; RAMALHO, J. (2006). Plano Nacional de Agroenergia: 2006-2011. rev. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L.C.; CARDOSO, M. T. (2010). Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439.

OPENSHAW, K. (2000). A review of Jatropha curcas: an oil plant of unfulfilled promise. Biomass & Bioenergy, v.19, p.1-15.

ORSINI, R. R. (2012). Estudo do aproveitamento do resíduo da lavoura cafeeira como fonte de biomassa na produção de hidrogênio. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais). Universidade de São Paulo. 142 f. São Paulo/SP.

OSWALD, W. J. (1988). Large-scale algal culture systems (engineering aspects). In: Borowitzka, M. A., Borowitzka, L. J. (Org.). Micro-algal biotechnology. Cambridge: Cambridge University Press, 357-394.

PADILHA, A.C.M., LEAVY, S., SAMPAIO, A., JERÔNIMO, F.B. (2005). Gestão ambiental de resíduos da produção na Perdigão Agroindustrial S/A - Unidade Industrial de Serafina Corrêa – RS. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 43. Ribeirão Preto/SP.

PANICHELLI, L.; GNANSOUNOU, E. (2008). GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities. Biomass and Bioenergy. v. 32, n. 4, p.289-300. DOI:10.1016/j.biombioe.2007.10.008.

PAOLIELLO, J. M. M. (2006). Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. Dissertação (Faculdade de Engenharia). Universidade Estadual Paulista. Bauru/SP.

PAULA, L.E. e R. (2010). Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. Dissertação (Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras. 83f. Lavras/MG.

PEDROZA, M.M., VIEIRA, G.E.G., SOUSA, J. F., PICKER, A. C., LEAL, E. R. M., MILHOMEN, C. C. (2010). Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. Revista Liberato, Novo Hamburgo, V.11, n. 16, p. 89-XX.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., and McMAHON, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol.Earth Syst. Sci., 11, 1633-1644, doi:10.5194/hess-11-1633-2007.

PEIXOTO, A.R. (1973). Plantas oleaginosas arbóreas. São Paulo: Nobel. 284p.

PEREIRA, B. A. S. (1996) Flora nativa. In: DIAS, B. F. S. (Coord.). Alternativas de desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis. Brasília, DF: Fundação Pró-Natureza, p. 53-57.

PEREIRA, J.C.D, STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J.Y. (2000). Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa.

PEREIRA Jr., A. O., PEREIRA, A. S., LA ROVERE, E. L., BARATA, M. M. L., VILLAR, S. C., PIRES, S. H. (2011). Strategies to promote renewable energy in Brazil. Renewable and sustainable energy reviews, v. 15, n. 1, p. 681-688.

PEREIRA Jr., A. O., COSTA, R. C., COSTA, C. V., MARRECO, J. M., LA ROVERE, E. L. (2013). Perspectives for the expansion of renewable energy sources in Brazil. Renewable and sustainable energy reviews, v. 23, p. 49-59.

PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; da SILVA, N. F. (2012). The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 6, p. 3786-3802.

PEZZOPANE, J. E. M. et al. (2012). Agrometeorologia: aplicações para o Espírito Santo. Campus de Alegre da Universidade Federal do Espírito Santo. 174 p. Alegre/ES.

PINHEIRO, P.C.C.; FIGUEIREDO, F.J.; SEVE, O. (2005). Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. Biomassa e Energia; 2(2): 159-168.

POETSCH, J. et al. (2012). Acrocomia aculeata — a sustainable oil crop. Rural 21, v. 3, p.41-44.POMPERMAYER, R. S. & PAULA JUNIOR, D. R. de. (2003). Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural, 2000, Campinas (SP, Brazil) [online]. 2003 [cited 24 April 2017]. Available from:http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200055&lng=en&nrm=iso, acesso em: 11/10/2016.

Portal de Notícias – iBAHIA. (2012). Estados brasileiros investem em tecnologia para transformar esgoto em energia. Disponível em http://www.ibahia.com/detalhe/noticia/estados-brasileiros-investem-em-tecnologia-para-transformar-esgoto-em-energia/, acesso em: 19/04/2017.

POSSAS, J. M. C., CORREA, M. M., MOURA, G.B. A., LOPES, P. M.O., CALDAS, A. M., FONTES JUNIOR, R. V. P. (2012). Zoneamento agroclimático para a cultura do pinhão-manso no Estado de Pernambuco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.16, n.9, p.993–998.

PROCREARE (2017). Bovinocultura Brasileira. Disponível em http://procreare.com.br/bovinocultura/, acesso em: 05/04/2017.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. (2011). Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa

Referências Bibliográficas

vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133.

PURCINO, A.A.C; DRUMMOND, O. A. (1986). Pinhão manso. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG, 7p. (Documento).

RAMOS E PAULA, L.E, TRUGILHO P.F, NAPOLI A., BIANCHI M.L. (2011). Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. Cerne, v. 17, n. 2, p. 237-246.

RANTA, Tapio. (2005). Logging residues from regeneration fellings for biofuel production–a GIS-based availability analysis in Finland. Biomass and Bioenergy, v. 28, n. 2, p. 171-182.

REMADE – REVISTA DA MADEIRA (2005). Bioenergia. Energia Limpa e Abundante. Lettech Editora e Gráfica Ltda. Curitiba/PR.

REMAPE – Rede Macaúba de Pesquisa (2016). Sistemas de cultivo. Plataforma REMAPE, Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: http://www.macauba.ufv.br/?page_id=101, acesso em: 05/04/2017.

RESENDE, L.B., BITENCOURT, M.B. (2005). Rastreabilidade e tecnologia da informação – impactos econômicos sobre a cadeia produtiva da carne bovina brasileira. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL (SOBER), 43. Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: SOBER, 17p.

RESENDE, J. C. F., PIMENTEL, R. M. A., JUHÁSZ, A. C. P., SILVA, V. A. (2009). Pinhão-manso. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.). Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET. p.465-476.

RESTLE, J.; ALVES FILHO, D.C.; BRONDANI, I.L.; FLORES, J.L.C. (2000). Palha de soja (Glycine max) como substituto parcial da silage de sorgo forrageiro (Sorghum bicolor (L.) Moench) na alimentação de terneiros de corte confinados. Ciência Rural, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 319-324. ISSN 0103-8478

REZENDE, M. E. (2006). Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental. Belo Horizonte/MG.

RIBEIRO, C. A. A. S., MOUNTS, D. J., MENEZES, S. J. C., ROCHA, R. R. C., CHAVES, M. A., CASTRO, N. L. M., BARROS, K. O., MARTINS, B. F., GLERIANI, J. M, SOARES, V. P. (2015). An Equitable Approach for Compensating Municipalities of the Rio Grande Watershed for Electricity Generated by the Furnas Hydropower Plant, Brazil. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 40, n. 7, p. 913.

RIBEIRO, M. S. (2006). Coeficientes de cultura (Kc) e crescimento vegetativo de 'Acaia Cerrado' (Coffea arábica L) associados a graus-dia (2º ano). Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras. 83p. Lavras/MG.

ROCHA, M. S. R. S., ALMEIDA, R. M. R. G., CRUZ, A. J. G. (2017). Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras. Engevista, 19(1), pp 217-235.

ROCHA, M. F. V. (2011). Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de Eucalyptus grandis x Eucalyptus camaldulensis para energia. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. 84p.Viçosa/MG.

ROSA, A. P., CHERNICHARO, C. A. L., MELO, G. C. B. (2014). Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. Revista DAE. 55-62. 2014. DOI: 10.4322/dae.2014.140.

ROSCOE, R., RICHETTI, A., e MARANHO, E. (2007). Análise de viabilidade técnica de oleaginosas para produção de biodiesel em Mato Grosso do Sul. Revista Política Agrícola, 16, 48-59.

SANTOS, A. F.; AUER, C. G.; GRIGOLETTI JÚNIOR, A. (2001). Doenças do eucalipto no sul do Brasil: identificação e controle. Circular Técnica. Colombo: Embrapa.

SANTOS, G. R.; WEHRMANN, M. E. S. F. (2010). Agroenergia no Brasil: fragilidades, riscos e desafios para o desenvolvimento sustentável. Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica, v. 15, p. 1-13.

SANTOS, J. e FERREIRA, L.T. (2016). Vietnã e Indonésia produzem 25% do café no mundo. Embrapa Notícias, 21/10/2016. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/17340728/vietna-e-indonesia-produzem-25-do-cafe-no-mundo, acesso em: 10/01/2017.

SANTOS, R. C. (2010). Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras. 173 f. Lavras/MG.

SATO, F. A., SILVA, A. M., COELHO, G., SILVA, A. C., CARVALHO, L. G. (2007). Coeficiente de cultura (kc) do cafeeiro (Coffea arabica L.) no período de outono-inverno na região de Lavras – MG. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.27, n.2, p.383-391.

SATURNINO, H. M.; PACHECO, D. D.; KAKIDA, J.; TOMINAGA, N.; GONÇALVES, N. P. (2005). Produção de oleaginosas para o biodiesel. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 44-74.

SAVAGE, P. E., HESTEKIN, J. A. (2013). A Perspective on Algae, the Environment, and Energy. Environmental Progress and Sustainable Energy, 32(4), 877-883.

SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. (1995). Flowering and fruiting phenologies of the palm Acrocomia aculeata: patterns and consequences. Biotropica, Washington, DC, v. 27, n. 2, p. 168-173.

SCHMIDT, C. H. (2008). Estudo da viabilidade econômica para a implantação de um sistema de cogeração de energia em uma usina sucroalcooleira. Projeto de fim de curso (Escola Politécnica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ.
SCHNEIDER, V.E., PERESIN, D., TRENTIN, A.C., BORTOLIN, T.A., SAMBUICHI, R.H.R. (2012). Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas. Relatório de Pesquisa. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília.

SCHUMACHER, M. V.; CALIL, F. N.; VOGEL, A. L M. (2005). Apostila de silvicultura aplicada. Apostila didática, 120 p. Santa Maria/RS.

SEDIYAMA, G.C., MELO JUNIOR, J.C.F. de, SANTOS A.R. dos et al. (2001). Zoneamento agroclimático do cafeeiro (Coffea arabica L.) para o estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, v.9, n.3, p.501-509. Número Especial – Zoneamento Agrícola.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas/Associação Brasileira dos Criadores de Suínos (2016). / Mapeamento da suinocultura brasileira = Mapping of Brazilian Pork Chain - Brasília, DF, 376 p.

SHAH, A.; DARR, M.J.; MEDIC, D.; ANEX, R.P.; KHANAL, S.; MASKI, D. (2012). Techno-economic analysis of a production-scale torrefaction system for cellulosic biomass upgrading. Biofuels Bioprod. Biore?ning-Biofpr. 6 (1), 45 e 57.

SHEEHAN, J. (1998). A look back at the US Department of Energy's aquatic species program – Biodiesel from algae. TP-580-24910.

SIAMIG – Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais (2017). Perfil da produção. Disponível em: http://www.siamig.com.br/indicadores/perfil-da-producao, acesso em 23/04/17.

SILVA, W.J. (1981). Aptidões climáticas para as culturas do girassol, mamona e amendoim. Informe Agropecuário, v. 7 n. 82, p. 24-33.

SILVA, S. D. dos A. et al. (2007). A cultura da mamona no Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 115p. (Embrapa Clima Temperado. Sistemas de Produção, 11).

SILVA, A., LIMA, L. A., EVANGELISTA, A. W. P., MARTINS, C. P. (2011). Evapotranspiração e coeficiente de cultura do cafeeiro irrigado por pivô central. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.15, n.12, p.1215–1221.

SILVIUS, M.; VOGELAAR, J. & CRUZ, S. (2016). Geração de biogás da vinhaça com um novo tipo de reator anaeróbio. Disponível em https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/geracao-de-biogas-da-vinhaca-com-um-novo-tipo-de-reator-anaerobio/, acesso em: 24/04/2017.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. (2016). Diagnósticos de água e esgoto - 2014. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento ambiental. Brasília. Disponível em: www.snis.gov.br, acesso em: 13/04/2016.

SPINOSA, L., AYOL, A., BAUDEZ, J. C., CANZIANI, R., JENICEK, P., LEONARD, A. (2011). Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management. Water, 2011. v.3, p.702-717.

SOUZA, M. M. (2014). Propriedades de briquetes e pellets produzidos com resíduos sólidos urbanos. Tese (Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. 81f. Viçosa/MG.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; GRATTAPAGLIA, D.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.; GOMES, F.; MATTOS, E.; OTTO, M.; HAKAMADA, R.; MORAES, M. T. (2014). Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 3. Campinas. Anais...Curitiba: Embrapa Florestas. p. 81-98.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, R.A.; LOOS, R.A. (2010). The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. Forest Ecology and Management, Amsterdan, v. 259, p. 1684-1694.

SULTANA, A.; KUMAR, A. (2012). Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. Applied Energy. v. 94, p.192-201. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.01.052.

TEIXEIRA, L. C. (2005). Potencialidades de oleaginosas para produção de biodiesel. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 18-27.

TEIXEIRA, T. R. (2016). Cenários para instalação de usinas de biomassa florestal em Minas Gerais. Dissertação (Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 59f. Viçosa/MG.

TENERELLI, Patrizia; MONTELEONE, M. A. (2008). Combined land-crop multicriteria evaluation for agro-energy planning. Italy: SUSTOIL. University of Foggia.

TREDICI, M.R. (2007). Mass production of microalgae: photobioreactors. In: Richmond, A. (ed.) Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology, pp. 178-214. Blackwell Science, Iowa.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. (1996). Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de Eucalyptus saligna. Revista Cerne, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-11.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. da. (2001). Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (Himenea courbaril L.). Scientia Agraria, Piracicaba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. (2005). Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de Eucalyptus. Cerne, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186.

TURATTI, J.M. (2001). Extração e caracterização de óleo de café. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2. Vitória. Resumos expandidos... Brasília: EMBRAPA Café, p. 1533-1539.

UDOP – União dos Produtores de Bioenergia (2017). A História da Cana-de-açúcar - Da Antiguidade aos Dias Atuais. Disponível em: http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993, acesso em: 23/04/2017.

USDA | Foreign Agricultural Service 2016 (2016). Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home, acesso em: 05/04/2017.

VALE, A.T. (2011). Casca do café também é fonte de energia. Disponível em: http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=casca-cafe-fonte-energia-biomassa#.WI8HhlMrLuo, acesso em: 25/01/2017.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. Biomass and Bioenergy, v. 35, n. 9, p. 3748-3762.

VASUMATHI, K. K., PREMALATHA, M., SUBRAMANIAN, P. (2012). Parameters influencing the design of photobioreactor for the growth of microalgae. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16. 5443 – 5450.

VAZ Jr, S. (2011). Biorrefinarias: cenários e perspectivas. Embrapa Agroenergia, v. 176.

VENTAKESH, V.; NGUYEN, X.N. (1985). Evaporation and concentration of black liquor. In: HOUGH, G.W. (5) Chemical recovery in the alkaline pulping process. Atlanta: Tappi Press. 312p.

VIAN, C. E.F. (2017). Cana-de-açúcar: Energia elétrica. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_131_22122006154842.html, acesso em: 24/04/17.

VIDAL, H.M. (2001). Composição lipídica e a qualidade do café (Coffea arábica L.) durante armazenamento. Dissertação (Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa. 93 f. Viçosa/MG.

VIEIRA, A. A., COSTA, P. M. A., LOPES, D. C. (1991). Substituição do milho por dejetos de bovinos, em rações para suínos, recebendo caldo de cana-de-açúcar. Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia, v.20, n.1, p.01-13.

VIGANI, M., PARISI, C., CEREZO, E.R., BARBOSA, M.J., SIJTSMA, L., PLOEG, M., ENZING, C. (2015). Food and feed products from microalgae: Market opportunities and challenges for the EU. Trends in Food Science & Technology, 42. 81 – 92.

VILLA NOVA, N. A., FAVARINI, J. L., ANGELOCCI, L.R., DOURADO-NETO, D. (2002). Bragantia, Campinas, v. 61, n. 1, p. 81-88.

VOIVONTAS, D.; ASSIMACOPOULOS, D.; KOUKIOS, E. G. (2001). Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. Biomass and Bioenergy, v. 20, n. 2, p. 101-112.

von SPERLING, M. (2005). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. Ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais.452p. ISBN: 85-7041-114-6.

von SPERLING, M., GOLÇALVES, R.F. (2001). Lodo de esgotos: características e produção. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Ed.: Cleverson V. Andreolli, von Sperling Marcos, Fernando Fernandes. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná. 484p. ISBN: 85-88556-01-4.

WEIBULL, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. ASME Journal of Applied Mechanics. Transactions of The American Society of Mechanical Engineer, pp 293-297. September.

WIECHETECK, M. (2009). Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climaticas e Qualidade Ambiental. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental. Curitiba/PR. Disponível em: http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9884/Livro_Aproveitamento-res%C3%ADduos-e-subprodutos-Florestais-Politicas-fins-energ%C3%A9ticos_MMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y, acesso em: 25/06/2016.

WERLE S.; WILK R.K. (2010). A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. Renewable Energy, doi:10.1016/j.renene.2010.01.019.

WILÉN, C. et al. (2014). Wood torrefaction – market prospects and integration with the forest and energy industry. VTT Technology 163, 55 p.

WILKINSON, S. R., LOWERY, R. W. (1973). Cycling of mineral nutrients in pasture ecosystems. In: Buttler, G. W. and Balley, R. W. (eds.). Chemistry and Biochemistry of herbage, Vol. 2. New York: Academic Press, p. 247-315.

WOLLMANN, C. A., GALVANI, E. (2013). Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual. Soc. nat., Uberlândia, v. 25, n. 1, p. 179-190.

WORLD COMMISSION ON DAMS. (2000). Dams and Development: A New Framework for Decision-making: the Report of the World Commission on Dams. Earthscan.

YANG, J., XU, M., ZHANG, X., HU, Q., SOMMERFELD, M., CHEN, Y. (2011). Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance. Bioresour Technol. 102. 159–65.

ZANON, N.B. (2012). Análise econômica e de investimento da cultura do pinhão manso (Jatropha curcas L.). Ilha Solteira. 48f.

ZOCCAL, R (2016). Alguns números do leite. Revista Balde Branco. Disponível em: http://www.baldebranco.com.br/alguns-numeros-do-leite/, acesso em: 07/04/2017.

Atlas de Biomassa de Minas Gerais

NOE Novas Opções Energéticas

FAPEMIG

P&D ANEEL

CEMIG

MINAS GERAIS GOVERNO DE TODOS